



Titre: Comparaison de la qualité des simulations d'écoulements visqueux
turbulents sur différents maillages d'hexaèdres

Auteur: Daniel Piaget
Author:

Date: 2016

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Piaget, D. (2016). Comparaison de la qualité des simulations d'écoulements
visqueux turbulents sur différents maillages d'hexaèdres [Master's thesis, École
Citation: Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/2147/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/2147/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:** Marcelo Reggio, & François Guibault
Advisors:

Programme: Génie mécanique
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

COMPARAISON DE LA QUALITÉ DES SIMULATIONS D'ÉCOULEMENTS
VISQUEUX TURBULENTS SUR DIFFÉRENTS MAILLAGES D'HEXAÈDRES

DANIEL PIAGET
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MÉCANIQUE)
MAI 2016

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

COMPARAISON DE LA QUALITÉ DES SIMULATIONS D'ÉCOULEMENTS
VISQUEUX TURBULENTS SUR DIFFÉRENTS MAILLAGES D'HEXAÈDRES

présenté par : PIAGET Daniel

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. LAURENDEAU Éric, Ph. D., président

M. REGGIO Marcelo, Ph. D., membre et directeur de recherche

M. GUIBAULT François, Ph. D., membre et codirecteur de recherche

M. CAMARERO Ricardo, Ph. D., membre

DÉDICACE

À ma femme Catherine et mes deux filles Ariane et Émilie...

REMERCIEMENTS

Avant d’aller dans les détails des travaux de ce mémoire de maîtrise, nous voulons remercier toutes les personnes qui m’ont permis de compléter les travaux de maîtrise. Cette expérience enrichissante me suivra toute ma vie.

En premier lieu, je voudrais remercier mes deux directeurs de recherche François Guibault et Marcelo Reggio pour leurs aides, commentaires et encouragements. Ils ont rendu ce projet possible grâce à leur aide financière. Un grand merci aussi à toute l’équipe de recherche de l’IREQ pour avoir financé ce projet et pour tous leur aide et commentaires.

Aussi, un grand merci à toute l’équipe du laboratoire de recherche, et en particulier Christophe Devais qui m’a aidé avec tous les aspects de openFOAM durant le projet. Je voudrais remercier Monsieur Ricardo Camarero et Monsieur Éric Laurendeau qui ont accepté de faire partie du jury pour la présentation finale des travaux de ce mémoire.

RÉSUMÉ

Les travaux de ce mémoire traitent de la génération des maillages et des solutions numériques Reynold-Average Navier-Stokes (RANS) pour des écoulements visqueux turbulents dans des composantes de turbines hydrauliques. Nous allons nous attarder sur la technique de génération de maillage qui génère des maillages appelé des Maillages Cartésiens avec Couches structurées à la Paroi (MCCP). Ces types de maillage sont composés principalement d'éléments hexaédriques. L'utilisation de cette technique pour obtenir des solutions RANS pour des composantes de turbines hydrauliques est peu répandue. La majorité des solutions RANS pour des écoulements dans des composantes de turbines hydrauliques sont obtenues aujourd'hui avec des Maillages Multi-Blocs Structurés (MMBS). Les travaux de ce mémoire vont nous permettre de savoir si des solutions RANS exactes peuvent être obtenues en utilisant des maillages MCCP. Nous allons utiliser une méthodologie pour évaluer la qualité des solutions RANS obtenues avec des maillages MCCP en les comparant aux solutions obtenues avec des maillages MMBS.

Comme point de départ, nous avons choisi quatre cas pour tester cette technique de génération de maillage. Les choix des quatre cas ont été faits en fonction de données déjà disponibles tels des résultats expérimentaux et numériques. Les premiers trois cas tests sont similaires, avec certaines variations, au niveau des géométries d'entrée, de sorties et aux conditions imposées à l'entrée et à la sortie. Les solutions numériques pour les trois premiers cas sont très sensibles aux conditions limites imposées aux parois. Les conditions limites sont influencées par l'épaisseur et la qualité des couches visqueuses. Le quatrième cas est un cas plus complexe, qui possède écoulement principal et des écoulements secondaires. Cette géométrie plus réaliste va nous permettre de tester les algorithmes qui sont responsables de créer les couches visqueuses aux surfaces.

Le premier aspect de ce mémoire traite des maillages générés avec les trois générateurs de maillage suivants : snappyHexMesh, Hexpress Hybrid et cfMesh. Pour les trois premiers cas, nous avons utilisé les trois générateurs. Pour le Cas 4, seulement deux générateurs ont été utilisés. On n'a pas utilisé le mailleur snappyHexMesh pour le Cas 4, car il fut incapable de générer des couches visqueuses de qualité. Pour chaque générateur, les maillages seront comparés entre eux pour ressortir les aspects importants de chaque mailleur. Certaines mesures de qualité seront calculées pour les maillages obtenus. Les mesures de qualité des maillages seront illustrées et comparées entre elles. Cette analyse nous permettra de mieux comprendre le fonctionnement des algorithmes pour les différents générateurs de maillage. Les quatre géométries nous permettront d'examiner différents aspects des trois générateurs, telle la capture

des frontières des géométries. Cela nous permettra de voir les différences entre les algorithmes des trois générateurs de maillage.

Le deuxième aspect des travaux traite des solutions numériques RANS obtenues avec les différents maillages. Nous allons étudier la sensibilité des solutions RANS aux différents maillages en comparants avec des solutions numériques existantes et des données expérimentales. Cette étude va nous permettre de tester la sensibilité des solutions aux différents maillages.

ABSTRACT

This master thesis addresses mesh generation techniques and Reynold-Average Navier-Stokes (RANS) solutions applied to internal visqueous flows in hydraulic machinery components. We will focus on mesh generation techniques known as Cartesian Meshes with Structured Layers a the Wall (CMSW). This types of meshes are composed primarly of hexaedral elements. RANS solutions for hydraulic turbines components are rarely computed with this type of mesh. Most RANS solutions are computed today with Multi-Blocs Structured Meshes (MMSM). The methodology developped in this master thesis will permit us to validate if CMSW can be used to computed acurrate RANS solutions as compared to those solutions obtained with MMSM.

As a starting point, we have chosen four cases to test this mesh generation technique. The choices for the four cases were based on readaly available numerical RANS solutions and experimental data. Except for some small variations in the inlet geometries, outlet geometries and initial conditions at the inlet the first three cases are very similar. The initial conditions are highly influenced by the quality and thickness of the viscous layers. The most complex case is the forth case, which involves a principale and secondary flow fields. This geometry is the most complex among all four geometries. The last geometry will permit us to test more thoroughly the algorithms that are responsable for the creation of the viscous layers.

The first aspect of this master thesis work we will study the meshes that were generated with the three main mesh generators: snappyHexMesh, Hexpress Hybrid and cfMesh. All three mesh generators were used for the first three cases. Only two mesh generators were used for the fourth case. All the generated meshes will be compared between them in order to study the important features of each mesh generator. Certain quality mesures will be calculated on the generated meshes. The mesh quality mesures will be compared between them. This analysis will permit us to better understand the algorithms for the different mesh generators. The four geometries will permit us to better examine different aspects of all three mesh generators, such as capturing the geometry frontiers. This will permit us to show the differences between the algorithms of all three mesh generators

The second aspects of this master thesis is to analyse the RANS solutions obtained with the differents meshes. The first three cases are simples geometries, but are very sensitive to the imposed initial conditions at the walls. We will be studying how sensitive the RANS solutions are to the different meshes. The RANS solutions will be compared with existant numerical solutions and experimental data.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	iii
REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ	v
ABSTRACT	vii
TABLE DES MATIÈRES	viii
LISTE DES TABLEAUX	xi
LISTE DES FIGURES	xii
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xvi
LISTE DES ANNEXES	xvii
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Éléments de la problématique	2
1.2 Objectifs de recherche	3
1.3 Plan du mémoire	4
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	5
2.1 Historique des solutions numériques Reynold-Average Navier-Stokes (RANS) pour les composantes de turbines hydrauliques	5
2.2 Définitions	6
2.2.1 Domaine de calcul	6
2.2.2 Maillage	6
2.3 Types de maillages	6
2.3.1 Maillage Cartésien	6
2.3.2 Maillage Structuré	7
2.3.3 Maillage Non-Structuré	7
2.3.4 Maillage Hybride	7
2.3.5 Maillage Chimère	7
2.4 Classification des méthodes de génération de maillage	8

2.4.1	Classe un : Méthodes manuelles ou semi-automatiques	8
2.4.2	Classe deux : Méthodes Paramétriques ou par transformation inverse	8
2.4.3	Classe trois : Méthodes par décomposition de domaine	8
2.4.4	Classe quatre : Méthodes par insertion de points ou par création de nouveaux éléments	9
2.4.5	Classe cinq : Méthodes constructives	9
2.5	Algorithmes pour les maillages cartésiens	10
2.5.1	Méthode de décomposition par blocs	10
2.5.2	Méthodes de superpositions	10
2.5.3	Récents algorithmes de génération de maillage d'hexaèdres	11
2.6	Choix des générateurs de maillage utilisé pour le project	12
2.6.1	snappyHexMesh	12
2.6.2	Hexpress Hybrid	13
2.6.3	cfMesh	14
2.7	Évaluation de la qualité du maillage	15
2.8	Mesure de qualité pour le maillage	16
2.9	Résumé de l'état de l'art	18
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE		20
3.1	Les cas tests	20
3.1.1	Données Expérimentales de Clausen pour les trois premiers cas	20
3.1.2	Premier cas test, (Cas 1)	21
3.1.3	Deuxième cas test, (Cas 2)	23
3.1.4	Troisième cas test, (Cas 3)	24
3.1.5	Quatrième cas test, (Cas 4)	25
3.2	Générateurs de Maillage Hexaédriques	27
3.2.1	Génération des maillages pour les Cas 1-2-3	27
3.2.2	Génération des maillages pour le Cas 4	28
3.3	Solutions RANS	29
3.3.1	Quantités d'ingénierie Cas 1-2-3	33
3.3.2	Quantités d'ingénierie Cas 4	33
3.3.3	Comparaison des solutions numériques et expérimentales	34
3.4	Analyse de Convergence	34
CHAPITRE 4 GÉNÉRATION DE MAILLAGE		35
4.1	Résultats de la génération de maillage pour les quatre cas	35
4.1.1	Représentation graphiques des maillages	35

4.1.2	Composition des maillages	39
4.2	Discussion des aspects importants des générateurs de maillages	41
4.2.1	Capture des caractéristiques des géométries	41
4.2.2	Respect des surfaces géométriques des quatre cas	44
4.2.3	Contrôle du nombre total d'éléments et grosseur des éléments	45
4.2.4	Génération et contrôle des couches visqueuses	46
4.2.5	Contrôle de la qualité des éléments des maillages	47
4.3	Mesures de qualité des maillages pour les quatre cas	48
4.3.1	Cas 1	49
4.3.2	Discussion sur le Cas 1	50
4.3.3	Cas 2	52
4.3.4	Discussion sur le Cas 2	53
4.3.5	Cas 3	54
4.3.6	Discussion sur le Cas 3	55
4.3.7	Cas 4	56
4.3.8	Discussion sur le Cas 4	57
CHAPITRE 5	SOLUTIONS NUMÉRIQUES	59
5.1	Résultats des solutions RANS pour les Cas 1,2 et 3	59
5.2	Cas 1	60
5.3	Convergence solution numérique (Cas 1)	63
5.3.1	Discussion solutions numériques Cas 1	63
5.4	Cas 2	64
5.5	Cas 3	67
5.6	Discussion solutions numériques (Cas 2-3)	70
5.7	Résultats des solutions RANS pour Cas 4	71
5.7.1	Discussion solutions numériques Cas 4	72
CHAPITRE 6	CONCLUSION	74
6.1	Synthèse des travaux	74
6.2	Limitations de la solution proposée	75
6.3	Améliorations futures	76
RÉFÉRENCES	77
ANNEXES	82

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1	Conditions limites Cas 1	22
Tableau 3.2	Conditions limites Cas 2	24
Tableau 3.3	Conditions limites Cas 3	25
Tableau 3.4	Conditions limites Cas 4	25
Tableau 4.1	Composition des maillages pour Cas 1	39
Tableau 4.2	Composition des maillages pour Cas 2	40
Tableau 4.3	Composition des maillages pour Cas 3	40
Tableau 4.4	Composition des maillages pour Cas 4	40
Tableau 5.1	Quantités Cas 1-3	59
Tableau 5.2	Quantités d'ingénierie - Cas 1	60
Tableau 5.3	Quantités d'ingénierie - Cas 2	64
Tableau 5.4	Quantités d'ingénierie - Cas 3	67
Tableau 5.5	Quantités d'ingénierie - Cas 4	71

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Méthodologie générale pour des simulations numériques	2
Figure 2.1	Étape importantes pour la génération de maillages snappyHexMesh .	13
Figure 2.2	Étape importantes pour la génération de maillages Hexpress Hybrid	14
Figure 2.3	Étape importantes pour la génération de maillages cfMesh	15
Figure 3.1	Positions (mm) des capteurs de vitesses et des stress de Reynold (Nils- son et al., 2009)	20
Figure 3.2	Géométrie cas 1	21
Figure 3.3	Profile de vitesse cas 1 entrée du diffuseur conique	22
Figure 3.4	Géométrie cas 2	23
Figure 3.5	Géométrie cas 3	24
Figure 3.6	Profile de vitesses expérimentales Cas 4	26
Figure 3.7	Géométrie cas 4 (Nilsson and Page, 2005)	26
Figure 3.8	Étape Simple (Recktenwald, 2010)	32
Figure 4.1	Maillages fins (snappyHexMesh, Hexpress Hybrid, cfMesh) générés pour le Cas 1	35
Figure 4.2	Maillages fins (snappyHexMesh, Hexpress Hybrid, cfMesh) générés pour le Cas 2	36
Figure 4.3	Maillages fins (snappyHexMesh, Hexpress Hybrid, cfMesh) générés pour le Cas 3	37
Figure 4.4	Maillage fin généré avec Hexpress Hybrid pour le Cas 4	38
Figure 4.5	Maillage fin généré avec cfMesh pour le Cas 4	38
Figure 4.6	Maillage Castellated Non-conforme	41
Figure 4.7	Maillage Snap Non-conforme	41
Figure 4.8	Maillage Castellated conforme	42
Figure 4.9	Maillage Snap conforme	42
Figure 4.10	Géométrie surface unique sortie lime	42
Figure 4.11	Maillage non-conforme	42
Figure 4.12	Géométrie de la sortie avec 3 surfaces	43
Figure 4.13	Géométrie de la sortie avec 3 surfaces	43
Figure 4.14	Maillage conforme	43
Figure 4.15	Maillage entrée-parois Cas 1 non-conforme	45
Figure 4.16	Maillage Hexpress Hybrid Cas 1 non-conforme	45
Figure 4.17	Maillage entrée-parois Cas 1 conforme	45

Figure 4.18	Maillage Hexpress Hybrid Cas 1 conforme	45
Figure 4.19	Maillage cfMesh Cas 2 couches visqueuses	47
Figure 4.20	Maillage cfMesh Cas 3 couches visqueuses	47
Figure 4.21	Cas 1 Distribution Volume Maillages fins	49
Figure 4.22	Cas 1 Distributions Forme Maillages fins	50
Figure 4.23	Cas 1 Distribution Ratio Maillages fins	50
Figure 4.24	Cas 2 Distribution Volume Maillages fins	52
Figure 4.25	Cas 2 Distribution Forme Maillages fins	52
Figure 4.26	Cas 2 Distribution Ratio Maillages fins	53
Figure 4.27	Cas 3 Distribution Volume Maillages fins	54
Figure 4.28	Cas 3 Distribution Forme Maillages fins	55
Figure 4.29	Cas 3 Distribution Ratio Maillages fins	55
Figure 4.30	Cas 4 Distribution Volume Maillages fins	56
Figure 4.31	Cas 4 Distribution Forme Maillages fins	57
Figure 4.32	Cas 4 Distribution Forme Maillages fin	57
Figure 5.1	Cas 1 Maillages snappyHexMesh Vitesse et Énergie cinétique turbulente	60
Figure 5.2	Cas 1 Maillage Hexpress Hybrid Vitesse et Énergie cinétique turbulente	61
Figure 5.3	Cas 1 Maillage cfMesh Vitesse et Énergie cinétique turbulente	61
Figure 5.4	Cas 1 Maillages snappyHexMesh C_p	62
Figure 5.5	Cas 1 Maillages Hexpress Hybrid et cfMesh C_p	62
Figure 5.6	Cas 1 courbes de convergence maillages fin	63
Figure 5.7	Cas 2 Maillage snappyHexMesh Vitesse et Énergie cinétique turbulente	65
Figure 5.8	Cas 2 Maillage Hexpress Hybrid Vitesse et Énergie cinétique turbulente	65
Figure 5.9	Cas 2 Maillage cfMesh Vitesse et Énergie cinétique turbulente	66
Figure 5.10	Cas 2 Maillages snappyHexMesh C_p	66
Figure 5.11	Cas 2 Maillages Hexpress Hybrid et cfMesh C_p	67
Figure 5.12	Cas 3 Maillage snappyHexMesh Vitesse et Énergie cinétique turbulente	68
Figure 5.13	Cas 3 Maillage Hexpress Hybrid Vitesse et Énergie cinétique turbulente	68
Figure 5.14	Cas 3 Maillage cfMesh Vitesse et Énergie cinétique turbulente	69
Figure 5.15	Cas 3 Maillages snappyHexMesh C_p	69
Figure 5.16	Cas 3 Maillages Hexpress Hybrid et cfMesh C_p	70
Figure 5.17	Cas 4 Maillage 3 Hexpress Hybrid et cfMesh C_p	71
Figure 5.18	Cas 4 Maillages Hexpress Hybrid C_p	72
Figure 5.19	Cas 4 Maillages cfMesh C_p	72
Figure A.1	Distribution Volume Cas 1	82
Figure A.2	Distribution Volume Cas 1	83

Figure A.3	Distribution Forme Cas 1	84
Figure A.4	Distribution Forme Cas 1	85
Figure A.5	Distribution Ratio Cas 1	86
Figure A.6	Distribution Ratio Cas 1	87
Figure A.7	Distribution Volume Cas 2	88
Figure A.8	Distribution Volume Cas 2	89
Figure A.9	Distribution Forme Cas 2	90
Figure A.10	Distribution Forme Cas 2	91
Figure A.11	Distribution Ratio Cas 2	92
Figure A.12	Distribution Ratio Cas 2	93
Figure A.13	Distribution Volume Cas 3	94
Figure A.14	Distribution Volume Cas 3	95
Figure A.15	Distribution Forme Cas 3	96
Figure A.16	Distribution Forme Cas 3	97
Figure A.17	Distribution Ratio Cas 3	98
Figure A.18	Distribution Ratio Cas 3	99
Figure A.19	Distribution Volume Cas 4	100
Figure A.20	Distribution Volume Cas 4	101
Figure A.21	Distribution Forme Cas 4	102
Figure A.22	Distribution Forme Cas 4	103
Figure A.23	Distribution Ratio Cas 4	104
Figure A.24	Distribution Ratio Cas 4	105
Figure B.1	Solutions RANS Cas 1 maillage snappyHexMesh	106
Figure B.2	Solutions RANS Cas 1 maillage snappyHexMesh	107
Figure B.3	Solutions RANS Cas 1 maillage snappyHexMesh	108
Figure B.4	Solutions RANS Cas 1 maillage Hexpress Hybrid	109
Figure B.5	Solutions RANS Cas 1 maillage Hexpress Hybrid	110
Figure B.6	Solutions RANS Cas 1 maillage Hexpress Hybrid	111
Figure B.7	Solutions RANS Cas 1 maillage cf Mesh	112
Figure B.8	Solutions RANS Cas 1 maillage cf Mesh	113
Figure B.9	Solutions RANS Cas 1 maillage cf Mesh	114
Figure B.10	Solutions RANS Cas 2 maillage snappyHexMesh	115
Figure B.11	Solutions RANS Cas 2 maillage snappyHexMesh	116
Figure B.12	Solutions RANS Cas 2 maillage snappyHexMesh	117
Figure B.13	Solutions RANS Cas 2 maillage Hexpress Hybrid	118
Figure B.14	Solutions RANS Cas 2 maillage Hexpress Hybrid	119

Figure B.15	Solutions RANS Cas 2 maillage Hexpress Hybrid	120
Figure B.16	Solutions RANS Cas 2 maillage cf Mesh	121
Figure B.17	Solutions RANS Cas 2 maillage cf Mesh	122
Figure B.18	Solutions RANS Cas 2 maillage cf Mesh	123
Figure B.19	Solutions RANS Cas 3 maillage snappyHexMesh	124
Figure B.20	Solutions RANS Cas 3 maillage snappyHexMesh	125
Figure B.21	Solutions RANS Cas 3 maillage snappyHexMesh	126
Figure B.22	Solutions RANS Cas 3 maillage Hexpress Hybrid	127
Figure B.23	Solutions RANS Cas 3 maillage Hexpress Hybrid	128
Figure B.24	Solutions RANS Cas 3 maillage Hexpress Hybrid	129
Figure B.25	Solutions RANS Cas 3 maillage cf Mesh	130
Figure B.26	Solutions RANS Cas 3 maillage cf Mesh	131
Figure B.27	Solutions RANS Cas 3 maillage cf Mesh	132

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ÉDP	Équations aux Dérivées Partielles
MMBS	Maillages Multi-Blocs Structurés
MCCP	Maillages Cartésiens avec Couches structurées à la Paroi
STL	Stereolithography Tessellation Language
RANS	Reynold-Average Navier-Stokes

LISTE DES ANNEXES

Annexe A	RÉSULTATS PARAMÉTRÉS DE QUALITÉ	82
Annexe B	SOLUTIONS RANS QUATRE CAS	106

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Les maillages sont utilisés dans une multitude de domaines, telles la cartographie, la géographie, l'ingénierie, l'océanographie, les effets spéciaux et les jeux vidéos. Dans le domaine de la simulation numérique, les maillages sont utilisés pour résoudre des problèmes impliquant des phénomènes physiques tels que les écoulements de fluides, le transfert de chaleur et les vibrations, parmi d'autres. Les techniques de génération de maillage ont évolué énormément depuis les quatre dernières décennies. Les premiers maillages furent utilisés pour résoudre des problèmes de mécanique de fluides dans les turbomachines et sur des ailes d'avions en deux dimensions. Avec le temps, les maillages furent adaptés pour des géométries plus complexes en 3 dimensions. Les techniques de génération de maillage ont évolué pour générer des maillages adaptatifs qui sont raffinés pour tenir compte des phénomènes qu'on désire prédire localement. L'évolution des méthodes numériques et des ordinateurs a permis de résoudre numériquement des problèmes de plus en plus complexes tels des écoulements multiphases ou des problèmes d'interaction fluide-structure. La méthodologie pour effectuer des simulations numériques pour des problèmes en mécanique des fluides peut être divisée en quatre étapes différentes (voir figure 1.1). Le modelleur géométrique génère le modèle géométrique du domaine de calcul. Le générateur de maillage discrétise le domaine de calcul en générant un maillage pour résoudre des Équations aux Dérivées Partielles (ÉDP). La solution des ÉDP est obtenue avec un solveur numérique. Finalement, une analyse de la solution est faite avec des outils de post-traitement, qui permettent de traiter et de visualiser les quantités d'ingénieries pertinentes au problème.

Dans le domaine des turbines hydrauliques, ainsi que dans d'autres domaines du génie, les simulations numériques effectuées pour résoudre l'écoulement permettent de diminuer le temps de conception. Une grande quantité de simulations numériques pour les turbines hydrauliques sont réalisées à l'aide de maillages générés avec des techniques de génération de Maillages Multi-Blocs Structurés (MMBS). Deux des plus grands problèmes avec les maillages MMBS sont le manque d'automatisation pour générer des maillages et la difficulté de raffiner les maillages localement. Pour ces raisons, les chercheurs ont repris la génération de maillage de type cartésien, où l'espace est décomposé en cellules qui ont les arêtes alignés avec les axes et ajustées près des parois (Fujimoto and Wang, 2008) et (Ito et al., 2008). Par contre, un problème apparaît proche de la paroi du domaine géométrique où le raccordement entre les cellules cartésiennes et les éléments surfaciques exige un certain découpage et raffinement des cellules, ce qui pose des difficultés géométriques et numériques. Une méthode qui permet de pallier ce problème est de générer des couches d'éléments structurés proche de la

paroi et de raccorder le maillage cartésien du domaine aux éléments proches de la paroi. Les maillages générés avec cette méthode sont les Maillages Cartésiens avec Couches structurées à la Paroi (MCCP).



Figure 1.1 Méthodologie générale pour des simulations numériques

1.1 Éléments de la problématique

L'utilisation de techniques automatiques pour générer des maillages en trois dimensions en décomposant le domaine de calcul en utilisant des Maillages Cartésiens avec Couches structurées à la Paroi pour résoudre des écoulements turbulents avec couches visqueuses dans des turbines hydrauliques n'est pas encore très répandue. Les techniques de génération de maillage les plus répandues pour résoudre des problèmes d'écoulements turbulents avec couches visqueuses dans les turbines hydrauliques sont celles qui génèrent les maillages de type Maillages Multi-Blocs Structurés. Les générateurs de maillage actuels utilisés pour obtenir des solutions numériques RANS reposent principale sur une décomposition du domaine de calcul fait par l'utilisateur. Une fois le domaine de calcul décomposé en divers blocs, un maillage peut être généré dans chaque bloc. Les maillages de chaque bloc doivent être connectés entre eux. Cette décomposition nous permet de mailler les parties les plus complexes du domaine de calcul (Frey and George, 2000).

Les inconvénients majeurs des maillages MMBS est que la qualité du maillage dépend énormément de l'expérience et des connaissances de l'utilisateur sur le type de problème à résoudre. Pour essayer de résoudre le manque de raffinement et de pouvoir générer les maillages d'une manière automatique, les maillages dits purement cartésiens sont devenus populaires. Un maillage cartésien décompose l'espace avec des arêtes des cellules sont alignées avec les axes et les éléments proches des parois sont ajustées (Fujimoto and Wang, 2008) (Ito et al., 2008). Quand le domaine de calcul est complexe, la décomposition du domaine proche des frontières peut entraîner des difficultés géométriques et numériques causées par les éléments qui sont dégénérés proches des parois. Une solution qui a été proposée est de faire croître des couches d'éléments près des parois pour éloigner les éléments de raccord plus loin dans le domaine de calcul. Cette solution nous permet de pousser les éléments qui vont introduire des erreurs numériques dans la partie de l'écoulement qui est plus uniforme.

La question à laquelle nous cherchons à répondre est : les maillages MMBS peuvent-ils être remplacés par des maillages MCCP pour calculer des solutions RANS équivalentes ou meilleures que celles obtenues avec des maillages MMBS dans des composantes de turbines hydrauliques? Nous avons choisi trois générateurs de maillages MCCP disponibles sur le marché.

Les maillages MCCP nous permettent de générer automatiquement un maillage structuré avec des couches structurées d'éléments à la paroi. Nous allons utiliser trois générateurs de maillages différents : Hexpress Hybrid(Numeca, 2014) snappyHexMesh (openFOAM, 2014) et cfMesh (Creatives Fields, 2015). Dans le cadre de ce projet, une série de cas tests seront effectués pour évaluer la qualité des maillages produits par les trois générateurs de maillage. Certains paramètres locaux géométriques des éléments tels le volume, l'oblicité et le ratio des côtés seront calculés pour être en mesure d'évaluer la qualité des éléments avant d'effectuer des simulations numériques pour obtenir des solutions RANS. Générer des maillages pour des géométries complexes avec des techniques de génération de maillage automatique ne s'avère pas un problème facile. Les difficultés rencontrées par le générateur de mailleur sont l'identification et la capture des caractéristiques telles les transitions entre deux surfaces, les angles droits telles les coudes. Les géométries complexes comme les diffuseurs hydrauliques, par exemple, comportent des angles droits, des surfaces irrégulières et des transitions entre des sections cylindriques et rectangulaires. Certaines de ces caractéristiques ne sont pas traitées correctement durant la génération des couches visqueuse par les générateurs de maillage, tels les angles droits. S'il y a des éléments qui sont dégénérées, par exemple avec des volumes négatifs, les couches d'éléments seront de mauvaise qualité ou même inversés, et aucun calcul ne pourra être effectué. Aucun cas canonique sera traité dans cette maîtrise. Le solveur simpleFOAM utilisé a déjà été validé par les travaux de (Bayraktar et al., 2012)(Gomez et al., 2014)(P. Ternik and Rudolf, 2014)(Bothe et al., 2014)(Peralta et al., 2014)(Ansar, 2016).

1.2 Objectifs de recherche

Les objectifs de notre projet de recherche peuvent être divisés en deux parties distinctes. Le premier objectif est la génération des maillages MCCP pour quatre cas tests. Cette première étape nous permettra d'évaluer trois différents générateurs de maillages cartésiens offerts sur le marché. La composition et la qualité de chaque maillage généré seront évaluées. Les quatre cas vont nous permettre de comparer et évaluer les trois différents générateurs de maillage entre eux. Les critères de comparaison entre chaque maillage seront trois mesures de qualités qui seront calculées pour chaque maillage.

Le deuxième objectif consiste à obtenir des solutions RANS avec les différents maillages et d'évaluer la convergence et les erreurs des solutions. Une comparaison sera effectuée avec des solutions obtenues à partir de maillage MMBS et des données expérimentales. Cette étape nous permettra de mieux comprendre si nous pouvons obtenir des solutions comparables avec des générateurs automatiques de maillage MCCP offerts sur le marché.

1.3 Plan du mémoire

Ce mémoire est divisé en six chapitres. Le chapitre 2 est une revue de littérature sur les techniques de génération de maillage avec une définition des métriques de qualité de maillage. Le chapitre 3 expliquera la méthodologie utilisée pour générer les maillages avec les trois générateurs de maillage. Les cas choisis seront présentés avec les données expérimentales disponibles. Le chapitre 4 présente les résultats des maillages générés pour les quatre cas, suivis par une discussion sur les trois générateurs de maillages. Le chapitre 5 présente les résultats des simulations numériques RANS des quatre cas, suivis par une discussion sur les solutions numériques. Le chapitre 6 sera la conclusion du mémoire.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

Cette partie de la mémoire a pour objectif de faire une revue de littérature sur la génération de maillages et définir certains termes. Nous allons commencer par un résumé de méthodes numériques pour la prédiction d'écoulements en considérant comme application les turbines hydrauliques. Par la suite, nous décrirons les différents types de maillages et expliquerons différentes méthodes pour les générer. Une partie de la revue de littérature sera concentrée sur les maillages cartésiens avec une revue des différents types d'algorithmes pour leur génération.

2.1 Historique des solutions numériques RANS pour les composantes de turbines hydrauliques

Dans le cadre des turbines hydrauliques, les premières simulations numériques furent en deux dimensions en résolvant l'écoulement potentiel, tel que rapporté dans (Keck and Sick, 2008). Par la suite, les équations d'Euler furent résolues numériquement en trois dimensions avec plusieurs composantes de turbines hydrauliques (Bottaro et al., 1993). Pour tenir compte du phénomène de turbulence et de la viscosité dans les simulations, les calculs furent effectués avec des solveurs basés sur le modèle de type RANS (Reynolds-averaged Navier-stokes equations). En décomposant les équations avec la méthode de décomposition de Reynolds, les vitesses et les pressions instantanées sont divisées en deux parties, une composante moyenne et une composante instantanée. La composante instantanée de la vitesse et de la pression représente la variation ou la fluctuation de ces quantités. Six nouveaux inconnus sont introduits par la décomposition. Pour être en mesure de résoudre le nouveau système d'équations, on doit introduire un modèle de turbulence. La littérature est riche sur le sujet et nous identifions le travail de (Alfonsi, 2009) comme un guide pour expliquer cette technique de résolution. Des écoulements turbulents tridimensionnels stationnaires furent simulés dans des diffuseurs hydrauliques, tels que dans (Drtina et al., 1992). Les travaux suivants (Vu et al., 2010) (Berhanu Mulu and M., 2007) (Page et al., 2010) illustrent que les solutions RANS s'imposent aujourd'hui comme un standard pour la prédiction numérique d'écoulements turbulents. Le modèle de turbulence $k-\epsilon$, qui fut développé dans les années 1970 (Launder and Spalding, 1974), est encore un modèle de turbulence très utilisé dans les solveurs RANS.

2.2 Définitions

2.2.1 Domaine de calcul

Le domaine de calcul d'un problème est fondamentalement défini par ses frontières. Les frontières de la géométrie peuvent être représentées par des courbes pour un problème en deux dimensions ou des surfaces pour un problème en trois dimensions. est très répandu pour représenter les surfaces. Ce format a été créé par la compagnie 3DS en 1988 (Company, 1988). Le format Stereolithography Tessellation Language (STL) décrit les surfaces comme des faces composées d'une série de triangles. Chaque triangle est représenté par trois points et par une normale. En pratique, la direction de la normale est déterminée par l'ordre (horaire ou antihoraire) des sommets.

2.2.2 Maillage

Un maillage est une discrétisation qui couvre d'éléments géométriques simples un domaine sans chevauchement ni vide. Les éléments de base ont des propriétés de position et de dimension et des informations topologiques tels la connectivité et le voisinage (Bern and Plassman, 1999) (Camarero, 2009). Pour simuler un écoulement en mécanique des fluides, par exemple dans une turbine hydraulique, nous devons résoudre des Équations aux Dérivées Partielles sur un domaine géométrique donné ou dans un volume donné. L'équation de Laplace peut être résolue pour obtenir l'écoulement potentiel. Les équations d'Euler peuvent aussi être résolues si les effets des couches visqueuses sont négligés pour l'écoulement. Les éléments du maillage nous permettent de discrétiser les équations aux dérivées partielles en équations algébriques. Les équations algébriques peuvent être résolus par la méthode des différences finies (Rai and Moin, 1991), les volumes finis, ou les éléments finis.

2.3 Types de maillages

Une façon de classer les maillages consiste à les regrouper selon leurs propriétés.

2.3.1 Maillage Cartésien

La manière la plus simple et efficace, pour discrétiser un domaine géométrique est de générer un maillage cartésien. Un maillage cartésien est généré en découpant le domaine géométrique avec des droites d'une manière régulière pour un maillage en deux dimensions et des plans pour un maillage en trois dimensions. On obtient des quadrilatères en deux dimensions ou des hexaèdres en trois dimensions (Frey and George, 2000). Cette technique de génération de

maillages peut être améliorée grâce aux techniques suivantes : des algorithmes de recherche, les structures de données et des schémas de recherche. Le travail de (Fukushima et al., 2015) illustre l'utilisation des maillages cartésiens pour résoudre des problèmes d'acoustique pour des applications en aéronautiques.

2.3.2 Maillage Structuré

Un maillage est structuré quand tous les sommets ont la même connectivité. Chaque sommet a le même nombre d'arêtes incidentes. Les techniques pour générer les maillages structurés sont principalement classées en deux catégories : les techniques algébriques et par les résolutions d'équations (Soni, 2000). Des travaux récents de (Wei et al., 2014) montrent l'utilisation des maillages structurés mobiles pour des applications d'écoulements externes autour de structures civiles telles que les immeubles.

2.3.3 Maillage Non-Structuré

Un maillage non structuré est souvent composé de triangles en deux dimensions et des tétraèdres en trois dimensions. La table de connectivité spécifie la relation entre les nœuds et les éléments. Les maillages non structurés peuvent être générés, entre autres, par les méthodes suivante : algorithme de subdivision quadtree-octree, triangulation de Delaunay et méthodes d'avances de front (Camarero, 2009).

2.3.4 Maillage Hybride

Un maillage hybride est composé en partie de maillages structurés et non-structurés. Les maillages sont composés d'éléments prismatiques et de tétraèdres. Les éléments prismatiques servent pour discrétiser les couches limites et les sillages et les éléments tétraédriques sont utilisés pour discrétiser le reste du domaine (Bern and Plassman, 1999). Les interfaces entre les parties structurées et non-structurées du maillage doivent être bien définies pour permettre l'obtention d'une solution numérique correcte.

2.3.5 Maillage Chimère

Les maillages chimères sont composés de deux maillages. L'information est échangée entre les deux maillages en interpolant. Les travaux de (Atta, 1981) furent les premières à présenter cette approche pour des maillages en deux dimensions. Les travaux de (Benek et al., 1983) (Benek et al., 1985) (Benek et al., 1987) ont modifié cette méthode pour être appliqués sur des problèmes plus complexes.

2.4 Classification des méthodes de génération de maillage

Les méthodes de génération de maillage peuvent être regroupées en cinq grandes catégories (Frey and George, 2000). La liste est non exhaustive, mais nous permet de définir les catégories suivantes :

2.4.1 Classe un : Méthodes manuelles ou semi-automatiques

La première classe contient les méthodes manuelles ou semi-automatiques qui sont utilisées pour mailler un domaine simple tel un domaine topologiquement de forme carrée. L'utilisateur fournit les coordonnées en énumérant les points dans le domaine d'une façon explicite (Frey and George, 2000). Un exemple de cette technique sont les travaux de (Frederick et al., 1970).

2.4.2 Classe deux : Méthodes Paramétriques ou par transformation inverse

La méthode paramétrique consiste à projeter les points du domaine géométrique vers un espace paramétrique en effectuant une transformation inverse ou une application. La transformation inverse du domaine peut être effectuée de deux façons (Camarero, 2009) :

Méthodes algébriques

Les méthodes algébriques génèrent des maillages en utilisant une fonction qui relie les nœuds du domaine de calcul. Cette fonction génère les coordonnées des nœuds du maillage.

Méthodes basées sur les solutions d'équations

La deuxième méthode consiste à générer des maillages en résolvant des Équations aux Dérivées Partielles pour appliquer une transformation inverse du domaine géométrique vers un domaine paramétrique (Thompson et al., 1985). La résolution du système d'équations génère les coordonnées du nouveau maillage à l'intérieur du domaine géométrique. Les travaux de (Thompson, 1982) montrent comment générer des maillages en utilisant des solutions à des équations elliptiques.

2.4.3 Classe trois : Méthodes par décomposition de domaine

La méthode par décomposition de domaine consiste à subdiviser le domaine en plusieurs parties plus petites. Les nouveaux domaines doivent être similaires au domaine géométrique

original. La décomposition du domaine peut être effectuée par deux méthodes différentes (Frey and George, 2000).

Méthodes de décomposition par blocs

Le domaine géométrique est découpé en plus petits domaines ou blocs. Dans chaque bloc, un maillage structuré est généré (Frey and George, 2000). Les premières techniques de décomposition du domaine en quadrilatères furent les travaux de (Baehmman et al., 1987) appliqués à des géométries en deux dimensions pour générer des maillages structurés.

Méthodes de décomposition spatiale

La décomposition spatiale est une méthode qui décompose le domaine géométrique en cellules plus petites en subdivisant le domaine d'une manière récursive. Ce type de décomposition du domaine est faite automatiquement. Les techniques de quadtree et octree sont des méthodes de décomposition spatiale (Frey and George, 2000). Les travaux de (Wittek et al., 2016) résument l'état de l'art des méthodes de décomposition pour générer des maillages automatiques pour des applications biomédicale avec la méthode des éléments finis.

2.4.4 Classe quatre : Méthodes par insertion de points ou par création de nouveaux éléments

Ces types de méthodes consistent à discrétiser le domaine géométrique en insérant des points ou en créant des nouveaux éléments dans le domaine. La méthode d'avance de front crée de nouveaux éléments et la méthode de Delaunay insère de nouveaux points dans le domaine géométrique (Frey and George, 2000). La méthode d'avance de front a évolué depuis les années 1970. Les travaux récents (Löhner, 2014) sur la parallélisation de la méthode d'avance de front montrent l'évolution de cette technique de génération de maillage. Une approche aussi possible est de combiner la méthode de l'avance de front avec la méthode de Delaunay pour avoir une meilleure efficacité. Les travaux récents de (Engwirda and Ivers, 2014) démontrent les avancements combinant les deux méthodes pour la génération de maillage.

2.4.5 Classe cinq : Méthodes constructives

Les méthodes constructives génèrent un maillage final en unifiant différents types de maillages, qui peuvent être générés avec les méthodes décrites plus haut (Frey and George, 2000).

2.5 Algorithmes pour les maillages cartésiens

Les algorithmes capables de générer des maillages composés à la base d'éléments hexaédriques réguliers évoluent depuis quelques années. Les algorithmes peuvent être classés en deux méthodes selon (Thompson et al., 1999) : les méthodes de décomposition par blocs et les méthodes de superposition.

2.5.1 Méthode de décomposition par blocs

Cette méthode consiste à décomposer le domaine en blocs séparés pour permettre de générer le maillage avec des éléments hexaédriques pour chaque bloc. L'utilisateur doit décomposer manuellement le domaine. Cette technique peut s'avérer très longue et complexe. Pour être en mesure de générer un maillage automatiquement avec des éléments hexaédriques sur un domaine arbitraire, le domaine est décomposé en utilisant des axes médians, qui sont positionnés en se basant sur la technique de Delaunay (Price and Armstrong, 1997). Cette technique peut être appliquée sur des domaines en deux et trois dimensions. Les domaines en trois dimensions peuvent être maillés en insérant sous la surface du domaine des formes primitives tel que proposé par (Price and Armstrong, 1997). Cette technique peut être appliquée dans des domaines de calcul qui ont des géométries très exigeantes. Selon la géométrie, diverses primitives peuvent être utilisées pour compléter le maillage au niveau de la surface.

2.5.2 Méthodes de superpositions

Un algorithme proposé par (Schneiders, 1996) consiste à générer un maillage en deux ou trois dimensions en couvrant un domaine de calcul par une grille structurée. La dimension h de la cellule de la grille structurée est choisie en tenant compte de la caractéristique la plus petite du domaine. Tous les éléments à l'extérieur du domaine sont éliminés. Pour les maillages en deux dimensions, tous les nœuds intérieurs du maillage sont connectés avec les nœuds de la grille située à la frontière. Des polygones sont formés à la frontière. Pour les maillages en trois dimensions, la surface est considérée comme un maillage surfacique non structuré. La surface est décomposée en des quadrilatères. La décomposition de la surface est créée en projetant les sommets des faces extérieures du maillage intérieur vers la surface en suivant la direction normale de chaque face. L'intersection entre la normale de la face et la surface devient la position du nouveau sommet. Pour chaque quadrilatère, les quatre nouveaux sommets sont raccordés aux quatre sommets de la face correspondante du maillage intérieurs. Un nouvel élément est formé en connectant le quadrilatère et la face avec quatre nouvelles arêtes. Plusieurs techniques sont utilisées pour optimiser la position des nœuds à

la surface telle une technique de lissage.

Par la suite, les travaux (Schneiders et al., 1996) ont raffiné le précédent algorithme en remplaçant la grille structurée par un maillage initial de type octree. Le maillage initial est composé d'une boîte subdivisée en 27 octants. Chaque octant peut être divisé pour obtenir le niveau de raffinement désiré. Les nœuds intérieurs, pour un maillage en deux dimensions, qui ont seulement trois voisins sont dits pendants. Les nœuds pendants sont raccordés grâce à une série de patrons. articulier sont projetés sur ce côté ;

2.5.3 Récents algorithmes de génération de maillage d'hexaèdres

Une contribution récente par (Ito et al., 2008) propose cinq patrons additionnels pour générer des maillages d'hexaèdres dans des géométries complexes pour des applications biomédicales. Les algorithmes proposés permettent de traiter des géométries avec des surfaces convexes et concaves. Une couche d'éléments est insérée près de la surface pour éviter la formation d'éléments avec des jacobiens négatifs. Une contribution de (Maréchal, 2001) propose une méthode basée sur les octrees pour générer des maillages d'hexaèdres pour des géométries complexes. Les maillages sont générés en trois étapes distinctes. La première étape consiste à générer un maillage autour de la surface avec une technique d'octree qui contient une carte de dimension pour contrôler la taille des éléments hexaédriques. Par contre le maillage est non-conforme, car il contient des nœuds pendants. La prochaine étape est l'insertion des nouveaux éléments hexaédriques pour éliminer les nœuds pendants à l'intérieur des maillages et ainsi rendre le maillage complètement conforme. La surface géométrique est récupérée en identifiant les éléments qui intersectent la surface géométrique de triangles. Une projection des points des éléments surfaciques est effectuée sur les triangles. L'étape finale est l'insertion d'une nouvelle couche d'éléments sous la surface pour améliorer la qualité des éléments près de la surface.

Des améliorations ont été faites par la suite par (Maréchal, 2009) pour la génération de maillages dans des géométries avec des angles aigus, des géométries contenant des variétés et la génération de maillages adaptatifs. Pour pouvoir générer des maillages pour des composantes ayant des géométries comportant des angles aigus, chaque face du maillage de surface est associée à un triangle de la géométrie. Si deux faces adjacentes sont projetées sur des triangles qui ont un angle supérieur à l'angle spécifié pour détecter les arêtes, les arêtes communes des triangles sont identifiées comme des arêtes caractéristiques. Les coins sont identifiés en détectant les arêtes caractéristiques qui ont un angle supérieur à une borne spécifiée.

Pour générer des maillages dans des géométries complexes sans créer des surfaces irrégulières,

deux méthodes sont utilisées. La première méthode est l'insertion d'éléments hexaédriques sous la surface du maillage en divisant les éléments existants. L'autre méthode est l'insertion de nouveaux éléments à la surface pour éliminer les éléments qui ont deux arêtes projetées sur une même arête caractéristique de la géométrie. Après les insertions d'éléments sous la surface, les éléments sont projetés sur la surface géométrique et un algorithme d'optimisation de déplacement est appliqué sur les sommets pour permettre d'améliorer la qualité des éléments. La génération de maillage devient optimale en calculant l'élément hexaédrique qui correspond le mieux à l'élément original. Cela permet de minimiser les déplacements des sommets durant l'étape d'optimisation du maillage.

2.6 Choix des générateurs de maillage utilisé pour le project

Deux générateurs sont distribués gratuitement grâce à des licences GPL : snappyHexMesh (openFOAM, 2014) et cfMesh (Creatives Fields, 2015). Le troisième générateur de maillage commercial nommé Hexpress Hybrid (Numeca, 2014) est disponible grâce à une licence académique.

2.6.1 snappyHexMesh

Le générateur de maillage snappyHexMesh a besoin de trois fichiers pour générer un maillage en trois dimensions. Le premier fichier contient les surfaces en format STL de la géométrie du domaine de calcul. Le deuxième fichier est un fichier appelé snappyHexMeshdict. Ce fichier définit les paramètres pour chaque étape de la génération de maillage et les paramètres de contrôle de qualité pour les éléments du maillage. Le dernier fichier contient le maillage initial généré avec un générateur de maillage multi-blocs tel que blockMesh.

La génération de maillage par snappyHexMesh est faite en trois étapes. Un maillage appelé *Castellated Mesh* est généré durant la première étape à partir de la géométrie (fichier STL) et du maillage initial généré avec blockMesh. Durant la deuxième étape, le maillage Castellated Mesh est projeté sur la surface de la géométrie. Le maillage résultant est nommé *Snap mesh*. Lors de la dernière étape, les couches visqueuses sont générées en extrudant le maillage surfacique et en déplacement les nœuds internes du maillage. Voici un schéma de l'algorithme de génération de maillage de snappyHexMesh :

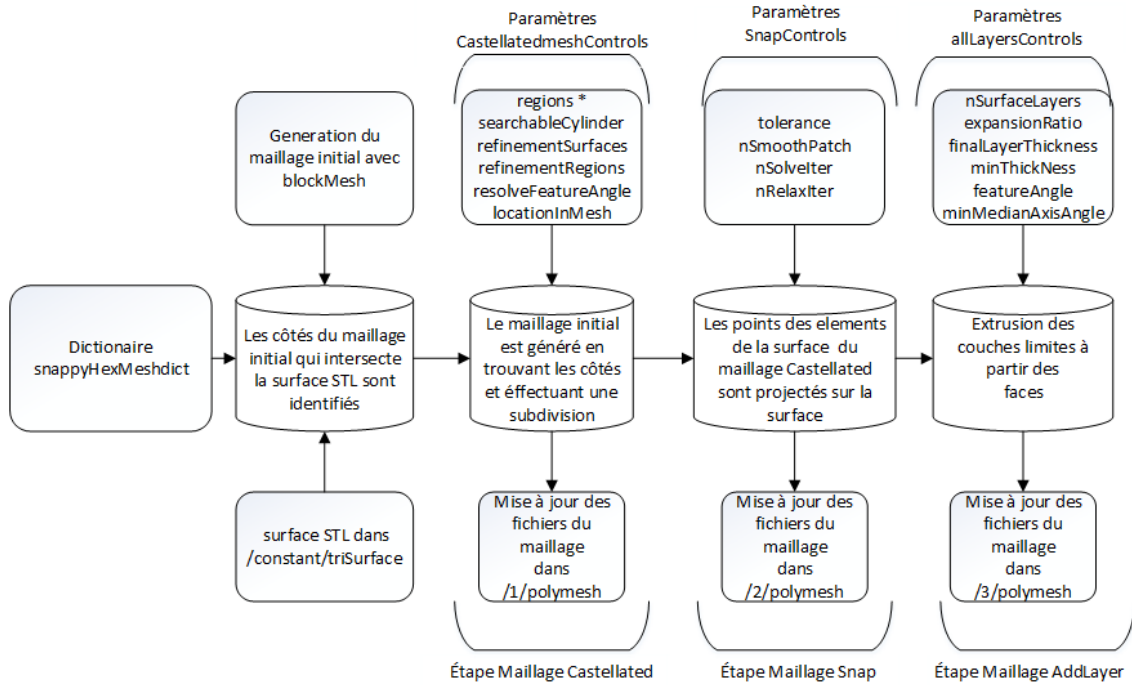


Figure 2.1 Étape importantes pour la génération de maillages snappyHexMesh

2.6.2 Hexpress Hybrid

Le générateur de maillage Hexpress Hybrid fait partie de la suite de NUMECA (Numeca, 2014). Pour générer un maillage hybride en trois dimensions, le générateur a besoin de la surface de la géométrie à mailler. La surface est décrite dans un format STL. Un nouveau fichier en format spyder est créé par Hexpress Hybrid à partir du fichier STL. Le fichier en format spyder contient les informations géométriques du domaine de calcul telles les surfaces, les arêtes, etc. Un fichier de configuration est ensuite généré dans Hexpress Hybrid grâce au fichier spider qui définit quelques paramètres comme la grosseur maximale des éléments, le nombre de niveaux de raffinement et le nombre de couches limites.

La génération de maillage par Hexpress Hybrid est faite en une seule étape visible. Le maillage initial qui va être projeté sur la surface, contient des hexaèdres, des pyramides et des tétraèdres. Après la projection du maillage initial sur la surface de la géométrie, les caractéristiques de la géométrie sont capturées. Les couche visqueuses sont insérées sous toute la surface à l'aide de prismes. Voici un schéma de l'algorithme de génération de maillage de Hexpress Hybrid :

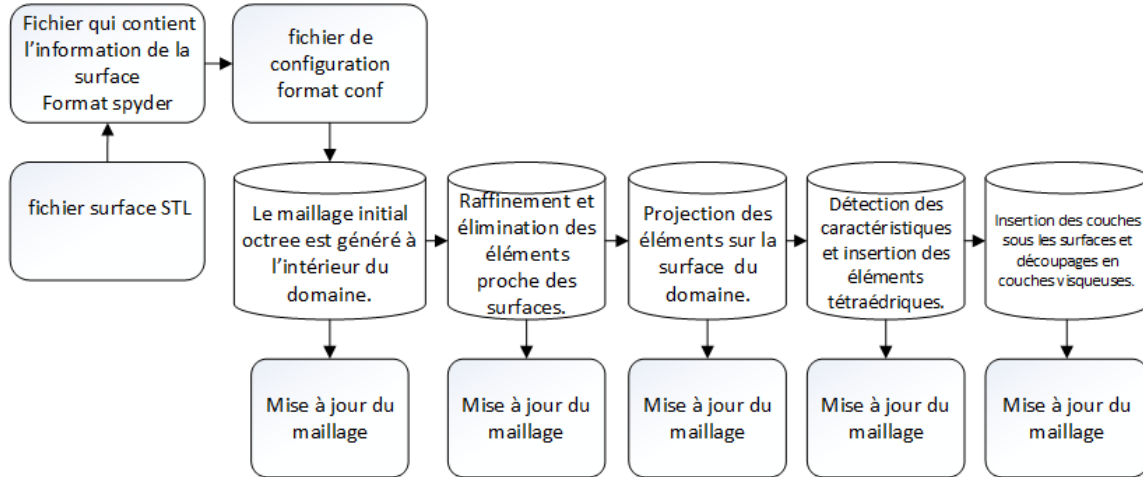


Figure 2.2 Étape importantes pour la génération de maillages Hexpress Hybrid

2.6.3 cfMesh

Le générateur de maillage cfMesh est conçu par (Creatives Fields, 2015). Le mailleur est distribué sous une licence ouverte GPL. Le logiciel utilise 2 fichiers pour générer un maillage en trois dimensions. Le premier fichier contient les surfaces décrites en format STL. Les surfaces peuvent aussi être représentées en deux autres formats, le format Foam Trisurface Format(FTR) et le format FMS natif à cfMesh. Le second fichier contient les différents dictionnaires qui initialisent les paramètres utilisés dans la génération de maillage.

Les maillages sont générés par cfMesh en plusieurs étapes. Par contre, seulement le maillage final peut être visualisé. Un maillage initial est généré pour le domaine de calcul. Le maillage surfacique est optimisé et le maillage est adapté aux caractéristiques de la géométrie. Une optimisation des éléments surfaciques et des couches visqueuses est effectuée. Voici une description des étapes majeures de l'algorithme pour générer un maillage avec cfMesh :

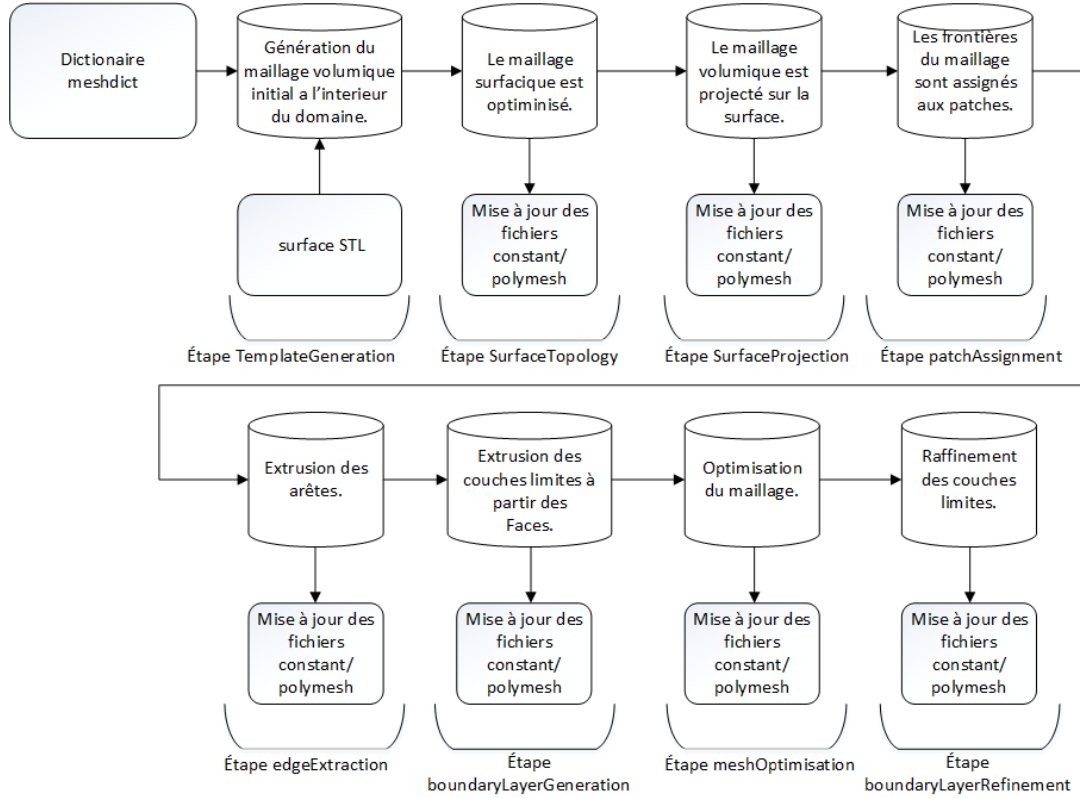


Figure 2.3 Étape importantes pour la génération de maillages cfMesh

2.7 Évaluation de la qualité du maillage

La qualité d'un maillage peut être définie de plusieurs façons. Un maillage peut être considéré de qualité si les éléments sont orthogonaux, de forme régulière et respectent le domaine de calcul, selon (Thompson et al., 1999). La relation entre certains paramètres géométriques des éléments qui composent le maillage, tels la longueur des côtés, l'angle interne maximale ou l'aire, et la qualité de la solution numérique obtenue avec le maillage n'est pas toujours évidente à établir. Une technique pour évaluer la qualité dite a priori est d'évaluer la qualité des éléments du maillage initial. Les propriétés géométriques des éléments du maillage peuvent être calculées tels l'orthogonalité, l'aire, le volume, etc. Les travaux de (Knupp, 2007) ont tenté d'établir un lien entre les paramètres géométriques qui influencent la solution numérique. Plusieurs techniques existent pour évaluer la qualité du maillage à posteriori comme les travaux de (Gao et al., 2014) pour des maillages composés d'éléments hexaédriques. Pour les problèmes numériques d'équations elliptiques, les travaux de (Formaggia and Perotto, 2003) propose une technique pour calculer l'erreur à posteriori. Pour évaluer l'ordre de convergence d'une série de maillages a posteriori, l'erreur est calculée entre la solution analytique et les

solutions numériques tel que décrit par les travaux (Roache, 2002).

2.8 Mesure de qualité pour le maillage

Pour évaluer la qualité des maillages, nous devons définir certains paramètres métriques. La qualité, selon (Knupp, 2007) est une caractéristique qui permet de résoudre un problème d'équations aux dérivées partielles avec une simulation numérique d'une manière efficace, et qui sera fidèle à la physique avec la précision désirée. Nous avons choisi trois paramètres métriques pour des éléments hexaédriques et tétraédriques, définis selon (Sandia, 2007). Ces mesures sont les suivantes :

- le volume ;
- la forme évalue si l'élément est proche de la forme d'un hexaèdre ou d'un tétraèdre régulier ;
- le ratio des côtés pour un élément est l'arête le plus court divisé par l'arête le plus long. ;

La distribution des volumes des éléments nous permet de voir s'il y a des éléments qui ont des volumes très petits ou négatifs. Aussi, la distribution nous permet de voir la transition entre les différents volumes pour chaque maillage. La distribution de la forme des maillages nous permet d'évaluer si les valeurs de forme des éléments sont proche de un ou de zéro, ou le zéro représente des éléments déformés. La distribution des ratios pour les maillages nous permet de voir s'il y a de grandes différences de ratio entre les longueurs des arêtes des éléments.

Volume élément hexaédrique

Les trois vecteurs principaux sont définis selon (Sandia, 2007) :

$$\begin{aligned}\vec{X}_1 &= (\vec{P}_1 - \vec{P}_0) + (\vec{P}_2 - \vec{P}_3) + (\vec{P}_5 - \vec{P}_4) + (\vec{P}_6 - \vec{P}_7) \\ \vec{X}_2 &= (\vec{P}_3 - \vec{P}_0) + (\vec{P}_2 - \vec{P}_1) + (\vec{P}_7 - \vec{P}_4) + (\vec{P}_6 - \vec{P}_5) \\ \vec{X}_3 &= (\vec{P}_4 - \vec{P}_0) + (\vec{P}_5 - \vec{P}_1) + (\vec{P}_6 - \vec{P}_2) + (\vec{P}_7 - \vec{P}_3)\end{aligned}$$

Le volume d'un élément hexaédrique est calculé en calculant le déterminant de la matrice jacobienne A_8 divisé par 64 (Sandia, 2007) :

$$\begin{aligned}A_8 &= (\vec{X}_1, \vec{X}_2, \vec{X}_3) \\ \alpha_8 &= \det(A_8) = \vec{X}_1 \cdot (\vec{X}_2 \times \vec{X}_3) \\ v_h &= \frac{\alpha_8}{64}\end{aligned}$$

Volume élément tétraédrique

Les trois vecteurs L_0, L_2 et L_3 sont définis pour un élément hexaédrique selon (Sandia, 2007) :

$$\begin{aligned}\vec{L}_0 &= \vec{P}_1 - \vec{P}_0 \\ \vec{L}_2 &= \vec{P}_3 - \vec{P}_2 \\ \vec{L}_3 &= \vec{P}_3 - \vec{P}_0\end{aligned}$$

Le volume d'un élément tétraédrique est le produit vectoriel des arêtes de la base L_2 et L_0 . Le vecteur résultant est multiplié en produit scalaire avec l'arête du côté L_3 . Le scalaire divisé par six (Sandia, 2007) :

$$v_t = \frac{(\vec{L}_2 \times \vec{L}_0) \cdot \vec{L}_3}{6}$$

Ratio des côtés d'un élément hexaédrique

Le ratio des côtés d'un élément hexaédrique est défini comme la longueur de l'arête la plus grande L_{max} divisée par l'arête la plus petite L_{min} selon (Sandia, 2007) :

$$\begin{aligned}L_{max} &= \max\{L_0, \dots, L_{11}\} \\ L_{min} &= \min\{L_0, \dots, L_{11}\} \\ r_h &= \frac{L_{max}}{L_{min}}\end{aligned}$$

Ratio des côtés d'un élément tétraédrique

Le ratio des côtés d'un élément tétraédrique est défini comme la longueur de l'arête la plus petite L_{min} divisée par l'arête la plus grande L_{max} selon (Sandia, 2007) :

$$\begin{aligned}
L_{max} &= \max\{L_0, L_1, L_2, L_3, L_4, L_5\} \\
L_{min} &= \min\{L_0, L_1, L_2, L_3, L_4, L_5\} \\
r_t &= \frac{L_{min}}{L_{max}}
\end{aligned}$$

Forme d'un élément hexaédrique

La forme d'un élément hexaédrique est définie comme étant trois fois le minimum des moyennes des jacobiens évalués aux coins (Sandia, 2007) :

$$f_h = 3 \min_{\{i \in \{0,1,\dots,8\}\}} \left\{ \frac{\alpha_i^{2/3}}{|A_i|^2} \right\}$$

Forme élément tétraédrique

La forme d'un élément tétraédrique est définie comme suit par (Sandia, 2007) ou les longueurs des arêtes sont $L_0 \ L_2 \ L_3$:

$$f_t = \frac{((\vec{L}_2 \times \vec{L}_0) \cdot \vec{L}_3 \sqrt{2})^{2/3}}{\frac{3}{2}(\vec{L}_0 \cdot \vec{L}_0 + \vec{L}_2 \cdot \vec{L}_2 + \vec{L}_3 \cdot \vec{L}_3) - (\vec{L}_0 \cdot -\vec{L}_2 + \vec{L}_0 \cdot \vec{L}_3 + -\vec{L}_2 \cdot \vec{L}_3)}$$

2.9 Résumé de l'état de l'art

Les diverses méthodes de générations de maillage ont évolué énormément au cours des 40 dernières années. Dans le domaine des simulations numériques pour les turbines hydrauliques, l'utilisation des maillages générés avec des techniques de décomposition par blocs est la plus répandue. L'utilisation des techniques de génération des maillages hexaédriques cartésiens avec couche à la paroi reste encore peu utilisée dans la simulation d'écoulements dans le domaine des turbines hydrauliques. Les divers algorithmes pour générer des maillages hexaédriques ont également évolué depuis plusieurs années. Les premiers patrons (Schneiders et al., 1996) furent appliqués sur des géométries simples et concaves. Par la suite, les algorithmes et les patrons furent améliorés. Les travaux de (Ito et al., 2008) ont permis de générer des maillages pour des géométries plus complexes telles que retrouvées dans les applications biomédicales. Les difficultés rencontrées dans la génération de maillages hexaédriques sont

les suivantes : mauvaise projection du maillage sur la géométrie, le maillage ne respecte pas la géométrie des frontières, éléments dégénérés proches des frontières et contrôle du nombre total d'éléments.

Trois générateurs de maillages hexaédriques vont être utilisés pour le projet de recherche. Le choix d'utiliser trois générateurs a été fait pour nous permettre de comparer trois générateurs de maillages hexaédriques. Les générateurs de maillages sont les suivants : snappyHexMesh, Hexpress Hybrid et cfMesh. Cette comparaison sera basée sur les solutions RANS obtenues avec des maillages hexaédriques et des solutions RANS obtenus avec des maillages Maillages Multi-Blocs Structurés. L'impact de la qualité du maillage sur les solutions RANS sera évalué. Les solutions RANS seront aussi comparées à des résultats expérimentaux.

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE

3.1 Les cas tests

Nous avons choisi quatre cas pour tester les différents maillages, effectuer des simulations numériques et les comparer avec des résultats expérimentaux. Les trois premiers cas sont des diffuseurs coniques avec des configurations différentes basées sur le diffuseur conique ERCOFTAC. Les données expérimentales pour les trois premiers cas sont basées sur les expériences faites par Clausen (Clausen et al., 1993) pour le diffuseur conique ERCOFTAC. Le choix des trois premiers cas tests est basé sur la disponibilité des solutions RANS utilisées pour la validation de openFOAM (openFOAM, 2014) (Nilsson et al., 2009). Les solutions RANS obtenues avec openFOAM furent calculées avec des maillages de type MMBS et comparées avec les résultats expérimentaux de Clausen.

3.1.1 Données Expérimentales de Clausen pour les trois premiers cas

Les mesures expérimentales des vitesses et des stress de Reynolds ont été effectuées à huit endroits différents à angle droit par rapport aux parois sur le diffuseur conique ERCOFTAC. Les valeurs de vitesse ont des erreurs estimées à 10%, mesurés avec des anémomètres de type fils chaud. Les valeurs des stress de Reynolds sont mesurées avec des capteurs de type X-fil avec des erreurs estimées à 2%. Les stress de cisaillements aux parois sont calculés avec une loi logarithmique à la paroi. L'expérience est bien décrite dans le document (Rodi et al., 1995).

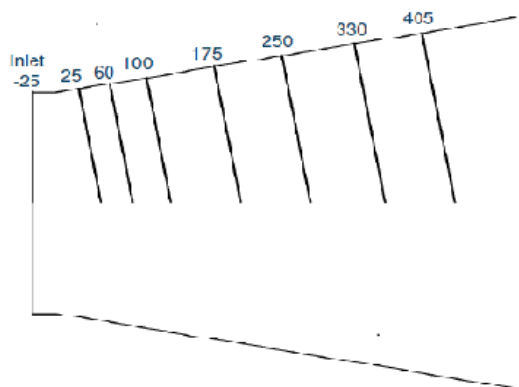


Figure 3.1 Positions (mm) des capteurs de vitesses et des stress de Reynold (Nilsson et al., 2009)

3.1.2 Premier cas test, (Cas 1)

Le générateur de tourbillon situé en amont de l'entrée du diffuseur conique ERCOFTAC est remplacé par un profil de vitesse expérimentale mesuré à l'entrée du cône. Les valeurs de $k-\varepsilon$ pour la modélisation de la turbulence sont initialisées aussi à l'entrée. En imposant un profil de vitesse expérimentale à l'entrée du diffuseur conique, au lieu de simuler une rotation du fluide, nous pouvons éliminer les erreurs venant du calcul en amont de l'entrée du diffuseur conique. Le premier cas a été validé en effectuant des simulations numériques avec un maillage MMBS. Les travaux de (Bounous, 2008) ont démontré que pour le Cas 1, les solutions étaient indépendantes des type de solveurs linéaires utilisés. Par contre, l'ordre des schémas de discrétisation utilisés affectent les solutions numériques. Les solutions obtenues avec les modèles de turbulences $k-\varepsilon$ et $k-\omega$ *SST* donnent des résultats similaires pour les vitesses. Le fait d'imposer une valeur de 0 comme vitesse radial à l'entrée du cône induit une erreur tous au long du cône. La valeur de zéro pour la pression initiale imposée à la sortie du diffuseur conique n'est pas réaliste. En imposant une valeur de zéro comme pression de sortie, la convergence de la solution numérique peut être impactée. Par contre, cette condition était imposée dans les travaux de (Bounous, 2008). Nous n'avons pas changé cette condition pour faire en sorte que le seul paramètre qui change pour les quatre cas est le type de maillage utilisé pour obtenir la solution.

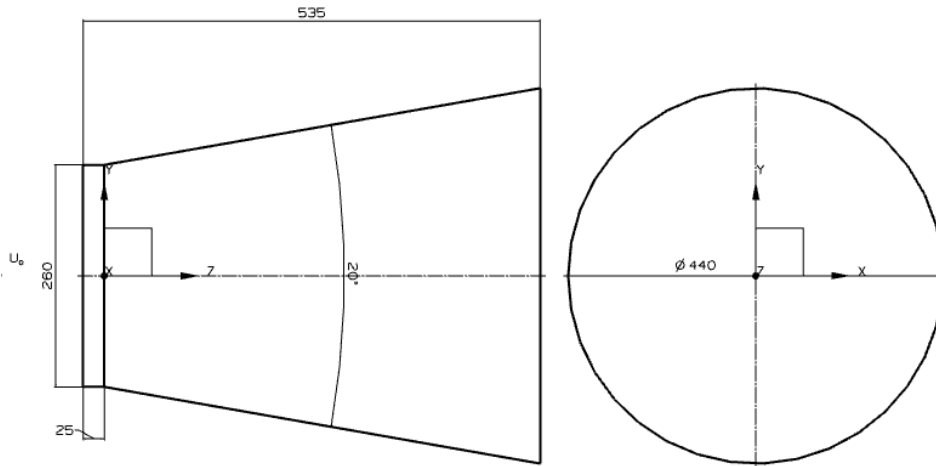


Figure 3.2 Géométrie cas 1

Les conditions limites imposées pour le Cas 1 sont les suivantes :

Tableau 3.1 Conditions limites Cas 1

Paramètre	Description
<i>Vitesse axiale entrée</i>	Vitesse expérimentale axiale (voir figure)
<i>Vitesse tangentielle entrée</i>	Vitesse expérimentale tangentielle (voir figure)
<i>Vitesse radiale entrée</i>	0
<i>k entrée</i>	k expérimentale (voir profile)
<i>ϵ entrée</i>	$c_\mu/k^2\nu(\mu_T/\mu)$
<i>pression sortie</i>	0

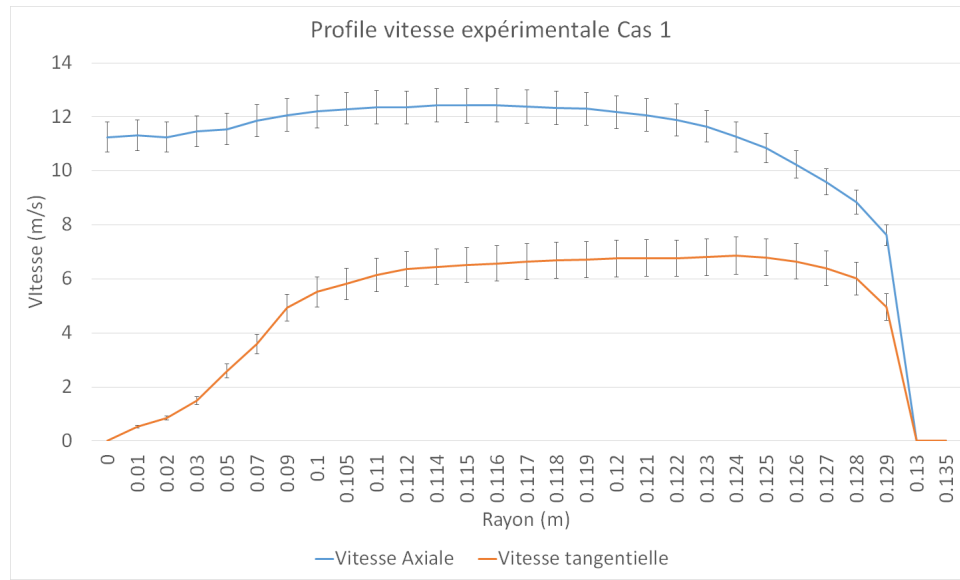


Figure 3.3 Profile de vitesse cas 1 entrée du diffuseur conique

3.1.3 Deuxième cas test, (Cas 2)

Le domaine de calcul du diffuseur conique ERCOFTAC a été modifié en ajoutant deux sections cylindriques, une à l'entrée et une à la sortie. La nouvelle section à l'entrée est divisée en deux parties. Un profile de vitesse constant dans la direction axiale est imposée à l'entrée de la première partie de la section. Une rotation solide est imposée sur la deuxième partie de la section. La rotation solide introduit une composante tangentielle de vitesse sur tous les éléments de cette section. Les conditions imposées à l'entrée sont identiques à celles des expériences de (Clausen et al., 1993). La nouvelle section à la sortie nous permet d'avoir un écoulement qui est moins influencé par la condition limite imposée à la sortie du domaine de calcul. La vitesse radiale devrait venir du calcul. La valeur de zéro pour la pression initiale imposée à la sortie de l'extension du diffuseur conique n'est pas réaliste. Par contre cette condition était imposée dans les travaux de (Bounous, 2008).

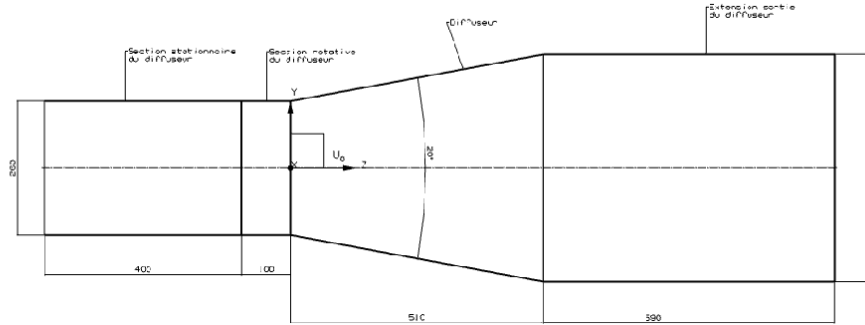


Figure 3.4 Géométrie cas 2

Les conditions limites imposées pour le Cas 2 sont les suivantes :

Tableau 3.2 Conditions limites Cas 2

Paramètre	Description
<i>Vitesse axiale entrée</i>	11.6 m/s
<i>Vitesse tangentielle entrée</i>	$\Omega r = 52.646 * r$ m/s
<i>Vitesse radiale entrée</i>	0
<i>k entrée</i>	$3/2(V_{axial} * I)^2 = 2.0184 \text{ m}^2/\text{s}^2$
<i>ϵ entrée</i>	$k^{1.5}/l_t = 896.10908 \text{ m}^2/\text{s}^3$
<i>pression sortie</i>	0

3.1.4 Troisième cas test, (Cas 3)

Pour le troisième cas, le domaine de calcul du diffuseur conique ERCOFTAC a été modifié en ajoutant une section cylindrique à l'entrée et deux sections cylindriques à la sortie. La nouvelle section à l'entrée est divisée en deux parties, comme pour le cas précédent. Un profile de vitesse constant dans la direction axiale est imposée à l'entrée de la première partie de la section. Une rotation solide sur le maillage interne est imposée sur la deuxième partie de la section. La rotation solide introduit une composante tangentielle de vitesse à toutes les éléments de la seconde partie. L'idée était de créer les conditions qui ont été imposées au diffuseur conique durant les expériences (Clausen et al., 1993). La première section à la sortie du diffuseur conique ERCOFTAC permet de simuler une condition d'ouverture à l'air.

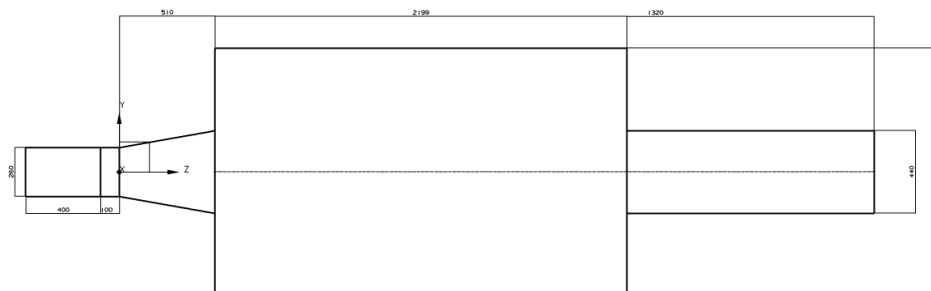


Figure 3.5 Géométrie cas 3

Les conditions limites imposées pour le Cas 3 sont les suivantes :

Tableau 3.3 Conditions limites Cas 3

Paramètre	Description
<i>Vitesse axiale entrée</i>	11.6 m/s
<i>Vitesse tangentielle entrée</i>	$\Omega r = 52.646 * r$ m/s
<i>Vitesse radiale entrée</i>	0
<i>k entrée</i>	$3/2(V_{axial} * I)^2 = 2.0184 \text{ m}^2/\text{s}^2$
<i>ϵ entrée</i>	$k^{1.5}/l_t = 896.10908 \text{ m}^2/\text{s}^3$
<i>pression sortie</i>	0

3.1.5 Quatrième cas test, (Cas 4)

Le quatrième cas est le diffuseur hydraulique Hölleforsen. Le choix du quatrième cas vise à tester une géométrie plus réaliste. Les données expérimentales pour le diffuseur hydraulique Hölleforsen furent présentées durant les travaux par (Andersson and Karlsson, 1999) et dans un rapport (Andersson and Dahlbäck, 1998). Un total de trois réunions eurent lieu (Engdtröm et al., 2001)(Nilsson and Page, 2005) où les données expérimentales pour deux points d'opérations T(r) et R(r) furent comparées avec des solutions RANS présentées par des chercheurs provenant d'universités et de compagnies. Nous allons utiliser les données expérimentales pour le point opération identifié comme le T(r), qui représente le point d'efficacité maximale. L'écoulement sera stationnaire et correspond à une chute de 4.5 mètres avec 60% du débit maximal.

Les conditions limites imposées au Cas 4 sont les suivantes :

Tableau 3.4 Conditions limites Cas 4

Paramètre	Description
U_{axiale}	Vitesse expérimentale axiale (voir figure)
$V_{tangentielle}$	Vitesse expérimentale circulaire (voir figure)
θ	$\theta_{cône} + \frac{\theta_{mur} - \theta_{cône}}{R_{mur} - R_{cône}}(r - R_{cône})$
$W_{radiale}$	$U_{axiale} \tan(\theta)$
<i>k entrée</i>	Valeurs expérimentales de μ , ν et ω
<i>ϵ entrée</i>	$C_\mu \frac{k^{3/2}}{l_{turb}}$ ou $C_\mu = 0.09$ et $l_{turb} = 0.1(R_{mur} - R_{cône})$
<i>pression sortie</i>	0

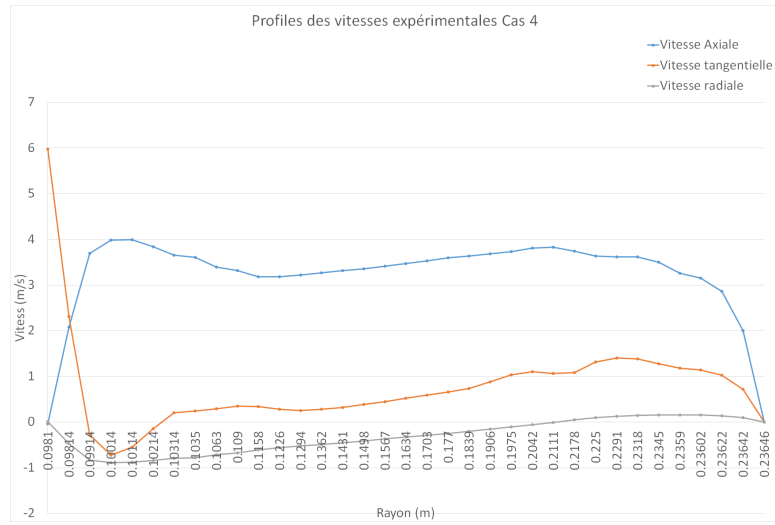


Figure 3.6 Profile de vitesses expérimentales Cas 4

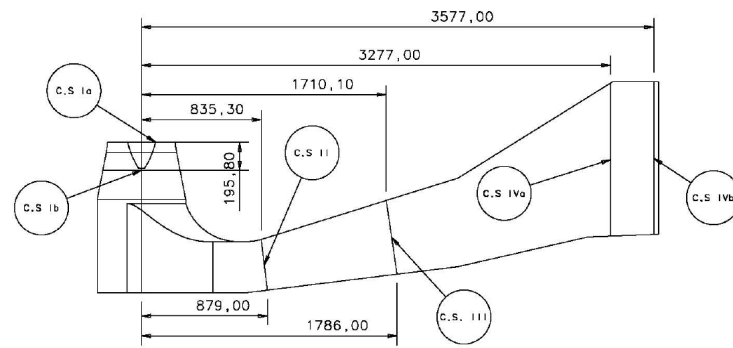


Figure 3.7 Géométrie cas 4 (Nilsson and Page, 2005)

3.2 Générateurs de Maillage Hexaédriques

Les outils de génération de maillage utilisés sont snappyHexMesh (openFOAM, 2014), Hexpress Hybrid (Numeca, 2014) et cfMesh (Creatives Fields, 2015) pour discrétiser les domaines de calcul. Les trois logiciels génèrent des maillages composés d'éléments hexaédriques et d'éléments polyédriques. Chacun des 3 logiciels utilise, pour générer un maillage, deux fichiers fournis par l'utilisateur. Le premier fichier contient la surface de la géométrie à mailler en format STL. Le second fichier contient les paramètres qui contrôlent le raffinement au niveau de la surface, la taille maximale des éléments, le nombre d'éléments dans les couches visqueuses, etc. Pour être en mesure de faire une étude de convergence pour les quatre cas, nous devons générer trois maillages de grosseur différente pour chaque cas avec chaque générateur de maillage.

3.2.1 Génération des maillages pour les Cas 1-2-3

Les géométries des Cas 1,2 et 3 sont très similaires, toutes composées d'un diffuseur conique, d'une entrée et d'une sortie. Pour le Cas 2, l'entrée et la sortie sont rallongées de sections cylindriques. Pour le Cas 3, la sortie est composée de deux sections cylindriques. L'entrée est similaire au Cas 2.

Logiciel snappyHexMesh

La première étape pour générer les maillages initiaux des trois cas est accomplie à partir de l'utilitaire blockMesh. Le maillage initial blockMesh va être composé d'éléments cubiques englobant la surface STL. Pour les trois cas, l'entrée et la sortie du maillage blockMesh doivent coïncider avec l'entrée et la sortie des surfaces STL. Cela nous permettra de capturer correctement les courbes de l'entrée et de la sortie des trois cas. Une décomposition additionnelle est effectuée sur les maillages initiaux blockMesh pour les Cas 2 et Cas 3. Pour bien capturer la surface, les maillages raffinés (maillage Castellated) doivent avoir le plus d'éléments (ou de points) à l'extérieur des surfaces. Cela nous permet de mieux projeter les maillages raffinés. Les maillages générés ont moins d'éléments que ceux générés avec Hexpress Hybrid ou cfMesh. La raison est due à la taille spécifiée de l'élément. La taille de l'élément le plus petit après le raffinement est la grosseur maximale des couches visqueuses. Seulement trois couches visqueuses ont été insérées pour les trois cas. L'insertion de plus de trois couches visqueuse produit des éléments de mauvaise qualité à cause de la création d'éléments polyédriques irréguliers. Le raccordement entre les couches visqueuses et le maillage intérieur devient difficile. L'épaisseur totale des couches visqueuses est aussi réduite. Si l'épaisseur totale des couches

visqueuses est trop petite, la turbulence aux parois est mal calculée.

Logiciel Hexpress Hybrid

La génération de maillage dans Hexpress Hybrid est accomplie en une seule étape. Les fichiers STL des trois cas ont été décomposés en surfaces distinctes pour permettre de capturer les caractéristiques des géométries. Pour les trois cas, nous devons choisir une grosseur d'élément qui est capable de capturer les caractéristiques du diffuseur conique. Pour le Cas 1, nous avons inséré deux couches d'éléments sous la surface. Par la suite, trois couches visqueuses ont été insérées dans la première couche. La grosseur des premiers éléments a été spécifiée. Pour le Cas 2, un total de cinq couches visqueuses ont été insérées. La grosseur de la première couche a été spécifiée. Pour le Cas 3, nous avons généré seulement trois couches visqueuses. La raison est que pour contrôler le nombre total d'éléments du maillage, nous sommes limités par le volume du diffuseur conique par rapport au volume de l'expansion à la sortie.

Logiciel cfMesh

Le logiciel cfMesh génère les maillages en une seule étape. Les mêmes fichiers STL utilisée avec Hexpress Hybrid ont été utilisés avec cfMesh. La capture des intersections entre les extensions aux entrées et sorties et le diffuseur conique pose des difficultés des fois pour cfMesh. Pour les Cas 2 et 3, le raccordement entre les maillages surfaciques entre les extensions et le diffuseur conique demeurent difficiles à réussir. Le nombre total d'éléments est contrôlé en spécifiant la grosseur maximale h de l'élément de base dans le fichier. Nous avons spécifié que 3 couches visqueuses devaient être insérées à la surface. Pour les trois cas, le nombre de couches visqueuses est choisi en fonction de la qualité des couches. Si le nombre de couches est augmenté, certains éléments proches de la paroi du diffuseur conique sont très petits. Cela cause des difficultés numériques.

3.2.2 Génération des maillages pour le Cas 4

Le quatrième cas est la géométrie la plus complexe. Elle est composée d'un diffuseur conique et d'un coude avec une zone d'expansion. Le cône de la turbine est inclus aussi dans la géométrie. Pour le Cas 4, nous avons seulement généré des maillages avec deux logiciels Hexpress Hybrid et cfMesh. Le logiciel snappyHexMesh n'a pas été utilisé, car la génération des couches limites pour certaines caractéristiques géométriques du Cas 4 était de mauvaise qualité.

Logiciel Hexpress Hybrid

La surface STL doit être décomposée en surface individuelle pour permettre à l'algorithme de Hexpress Hybrid de capturer les caractéristiques du diffuseur hydraulique. Nous avons aussi défini un cylindre à l'intérieur du cône, pour définir une zone à raffiner à l'entrée. Les éléments à l'intérieur du cône sont raffinés par un facteur de trois. Trois couches visqueuses ont été insérées sous la surface. La grosseur de la première couche visqueuse a été spécifiée. Trois maillages de taille différente ont été générés. Le maillage généré avec ICEM et fourni durant les réunions (Engdtröm et al., 2001)(Nilsson and Page, 2005) sera utilisé comme base de comparaison.

Logiciel cfMesh

La surface STL a aussi été modifiée en décomposant le fichier original en surfaces individuelles. Les parties haute et basse du diffuseur hydraulique ont été déclarées comme des surfaces séparées. Cela nous permet de capturer les intersections des surfaces et la transition entre l'entrée cylindrique et la partie rectangulaire de l'expansion. Aucun raffinement anisotropie dans la région de l'entrée du diffuseur n'a été effectué. La raison est que cela produit des polyèdres irréguliers qui empêchent la conversion du fichier de solution en format compatible pour le post traitement. Trois couches limites ont été insérées sur les différentes surfaces tels les murs et le cône de la turbine.

3.3 Solutions RANS

Les solutions RANS sont obtenues avec le solveur simpleFOAM (openFOAM, 2014). Le solveur est basé sur la résolution des équations de Navier-Stokes pour un fluide avec une seule phase. L'algorithme SIMPLE est utilisé pour obtenir une solution numérique et ainsi résoudre le champ de pression et de vitesse (Ferziger and Peric, 2012). Le solveur simpleFOAM (Jasak, 1996) résout les équations de Navier-stokes pour un écoulement monophasique, stationnaire, isotherme, sans aucune force externe et avec une densité et une viscosité constantes. Le solveur résout les équations de vitesses et de pression d'une manière ségrégée. Le solveur est d'ordre deux. Dans les expressions suivantes \mathbf{U} représente la vitesse, ρ la masse volumique, v_{eff} la viscosité turbulente et ∇p le gradient de pression.

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{U} &= 0 \\ \nabla \cdot (\mathbf{U}\mathbf{U}) + \nabla \cdot (v_{eff} \nabla \mathbf{U}) &= -\frac{1}{\rho} \nabla p\end{aligned}$$

Les deux équations doivent être discrétisées afin d'obtenir des solutions numériques RANS. L'équation de continuité en forme intégrale est discrétisée pour le domaine de calcul en calculant les flux sur tous les faces pour chaque élément. Pour chaque face f , le produit scalaire entre le vecteur de l'aire S_f et du vecteur de vitesse U_f est calculé. Les flux des faces sont additionnées au centroïde p pour tous les éléments selon la formule suivante :

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = \sum_f \mathbf{S}_f \cdot \mathbf{U} \mathbf{f}_f = 0$$

La partie droite de l'équation de transport est composée de deux termes, le premier terme représente la convection et le deuxième terme représente la diffusion. L'équation de transport en forme intégrale est discrétisée de la façon suivante :

$$a_P \mathbf{U}_P = H(\mathbf{U}_P) - \nabla p \iff \mathbf{U}_P = \frac{H(\mathbf{U}_P)}{a_P} - \frac{\nabla p}{a_P}$$

où le terme $H(\mathbf{U}_P)$

$$H(\mathbf{U}_P) = - \sum_N a_N \mathbf{U}_P$$

Pour chaque élément du domaine de calcul, une équation est générée. Une matrice est construite avec les équations, où les coefficients a_P sont situés sur la diagonale et les coefficients a_N sont hors de la diagonale. Les coefficients a_P incluent les contributions des termes de convection, diffusion et de turbulence. Les coefficients a_N incluent les contributions des

éléments voisins. La vitesse au centre de chacun des éléments peut être exprimée en isolant U_p dans l'équation discrète de l'équation de transport :

$$U_p = \frac{H(\mathbf{U})}{a_P} - \frac{(\nabla p)_f}{(a_P)_f}$$

Pour calculer la valeur de la vitesse sur la face f , une interpolation est faite avec l'équation précédente :

$$U_f = \left(\frac{H(\mathbf{U})}{a_P} \right)_f - \left(\frac{1}{a_P} \right)_f (\nabla p)_f$$

L'opérateur ∇ appliqué sur chaque côté de l'équation de transport fait apparaître la contrainte provenant de l'équation de continuité. Une fois que l'équation pour calculer la vitesse à la face est substituée dans l'équation de transport on trouve :

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{a_P} \nabla p \right) = \nabla \cdot \left(\frac{\mathbf{H}(\mathbf{U})}{a_P} \right) = \sum_f \mathbf{S} \cdot \left(\frac{\mathbf{H}(\mathbf{U})}{a_P} \right)_f$$

La forme finale de l'équation de transport permettant de corriger la pression devient :

$$a_P \mathbf{U}_P = H(\mathbf{U}_P) - \sum_f \mathbf{S}(p)_f, \\ \sum_f \left[\left(\frac{1}{a_P} \right)_f (\nabla p)_f \right] = \sum_f \mathbf{S} \cdot \left(\frac{\mathbf{H}(\mathbf{U})}{a_P} \right)$$

L'expression pour calculer le flux à la face est :

$$F = \mathbf{S} \cdot \mathbf{U}_f = \mathbf{S} \left[\left(\frac{\mathbf{H}(\mathbf{U})}{a_P} \right) - \left(\frac{1}{a_P} \right) (\nabla p) \right]$$

Le diagramme suivant décrit les étapes de l'algorithme simple pour résoudre les équations discrètes de Navier-Stokes

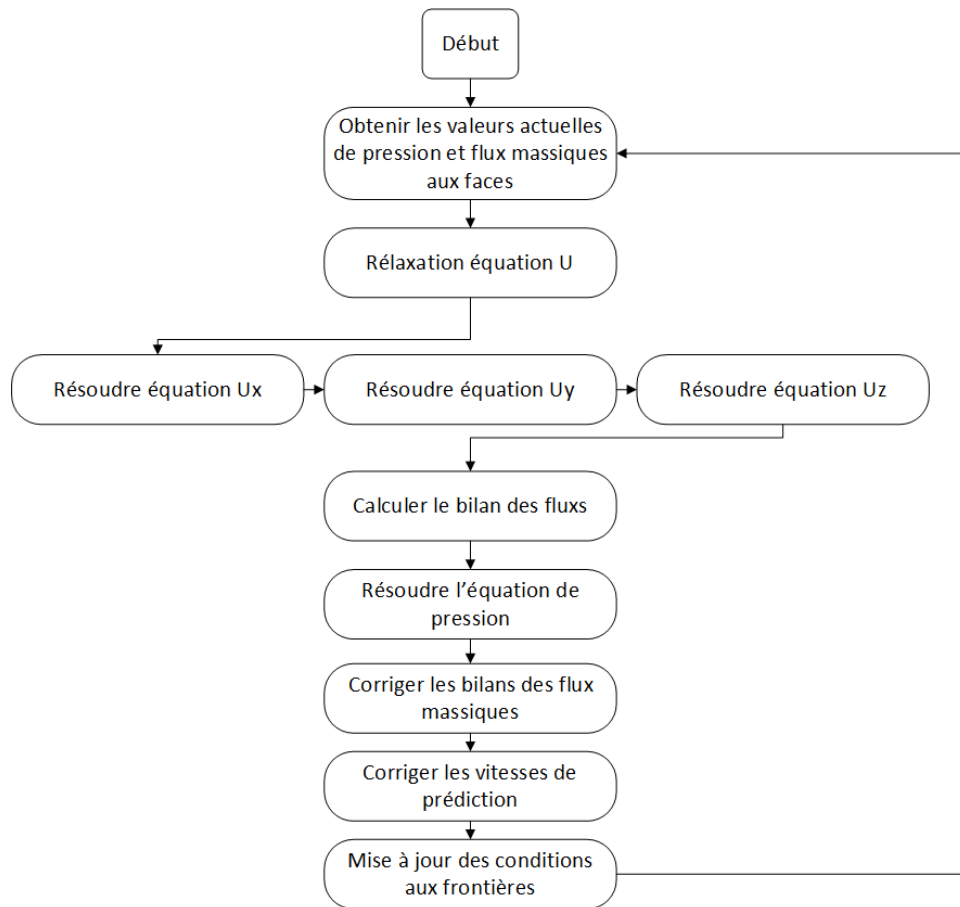


Figure 3.8 Étape Simple (Recktenwald, 2010)

3.3.1 Quantités d'ingénierie Cas 1-2-3

Pour les trois premiers cas, les quantités globales suivantes seront calculées :

Le coefficient de pression pariétal ((Clausen et al., 1993)) est calculé en utilisant U_b comme la vitesse moyenne à l'entrée du diffuseur, P_{atm} pression atmosphérique et P_{mur} pression pariétale :

$$C_p = \frac{P_{mur} - P_{atm}}{\frac{1}{2}\rho U_b^2} \quad (3.1)$$

Le coefficient de perte dans le diffuseur conique sera calculé pour tous les maillages générés avec les trois générateurs de maillage, donc les maillages grossiers, moyens et fins.

$$\zeta = \frac{\iint_{A_{entrée}} \left(p + \rho \frac{(\sqrt{u^2+v^2+w^2})^2}{2} \right) \vec{U} \cdot \hat{n} dA + \iint_{A_{sortie}} \left(p + \rho \frac{(\sqrt{u^2+v^2+w^2})^2}{2} \right) \vec{U} \cdot \hat{n} dA}{\iint_{A_{entrée}} \left| \rho \frac{(\sqrt{u^2+v^2+w^2})^2}{2} \vec{U} \cdot \hat{n} dA \right|} \quad (3.2)$$

3.3.2 Quantités d'ingénierie Cas 4

Pou le Cas 4, les quantités globales suivantes seront calculées :

Le coefficient de pression pariétal (Eq.3.1) sera calculé le long des parties haute et basse du diffuseur hydraulique.

Le coefficient de perte dans le diffuseur conique (Eq.3.2) sera calculé pour les deux types de maillages.

Les facteurs de correction d'énergie cinétique axiales et tourbillonnaires sont :

$$\alpha_{axiale} = \frac{1}{A\bar{u}^3} \int u_{ax}^2 dA \quad (3.3)$$

$$\alpha_{tourbillonnaire} = \frac{1}{A\bar{u}^3} \int u_{tang}^2 u_{ax} dA \quad (3.4)$$

Les facteurs de correction des quantités de mouvement axiales et tourbillonnaires sont :

$$\beta_{axiale} = \frac{1}{A\bar{u}_{ax}^2} \int_A u^2 dA \quad (3.5)$$

$$\beta_{tourbillonnaire} = \frac{1}{A\bar{u}_{ax}^2} \int_A u^2 dA \quad (3.6)$$

$$(3.7)$$

L'intensité tourbillonnaire est :

$$S = \frac{1}{R} \frac{\int_A [u_{tang} r (\rho u_{ax})] dA}{\rho \int_A u_{ax}^2 dA} \quad (3.8)$$

$$(3.9)$$

3.3.3 Comparaison des solutions numériques et expérimentales

Les différentes quantités d'ingénierie pour les quatre cas seront comparées avec les données expérimentales disponibles. Les données seront représentées sous forme de graphiques ou de tableaux au chapitre 5.

3.4 Analyse de Convergence

La convergence de nos solutions RANS pour les quatre cas sera vérifiée et illustrée pour le Cas 1. Les résidus de pression et de vitesses seront comparés selon le nombre total d'itérations pour les différentes solutions obtenues sur les différents types de maillages à la section 5.7 du chapitre 5.

CHAPITRE 4 GÉNÉRATION DE MAILLAGE

4.1 Résultats de la génération de maillage pour les quatre cas

Cette section comprend les résultats des générations de maillage pour les quatre cas. Pour les trois premiers cas, nous avons généré trois maillages avec chaque générateurs de maillage. Pour le Cas 4, nous avons généré un total de six maillages avec Hexpress Hyrbrid et cfMesh. La principale raison de ne pas générer des maillages avec snappyHexMesh pour le Cas 4, est que les couches visqueuses sont incomplètes et contiennent des éléments de mauvaise qualité.

4.1.1 Représentation graphiques des maillages

Cette première section présente en bloc tous les maillages générés, sous forme de figures (Fig 4.1 à Fig 4.5) et de tableaux (tableaux 4.1 à 4.4). Les illustrations des maillages sont toutes des coupes axiales. Les maillages pour les trois premiers cas sont axisymétriques.

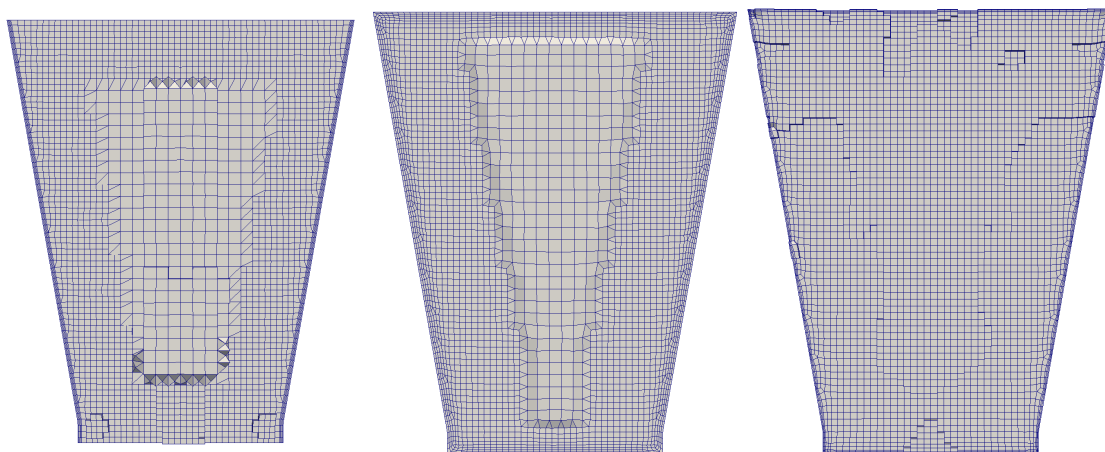


Figure 4.1 Maillages fins (snappyHexMesh, Hexpress Hybrid, cfMesh) générés pour le Cas 1

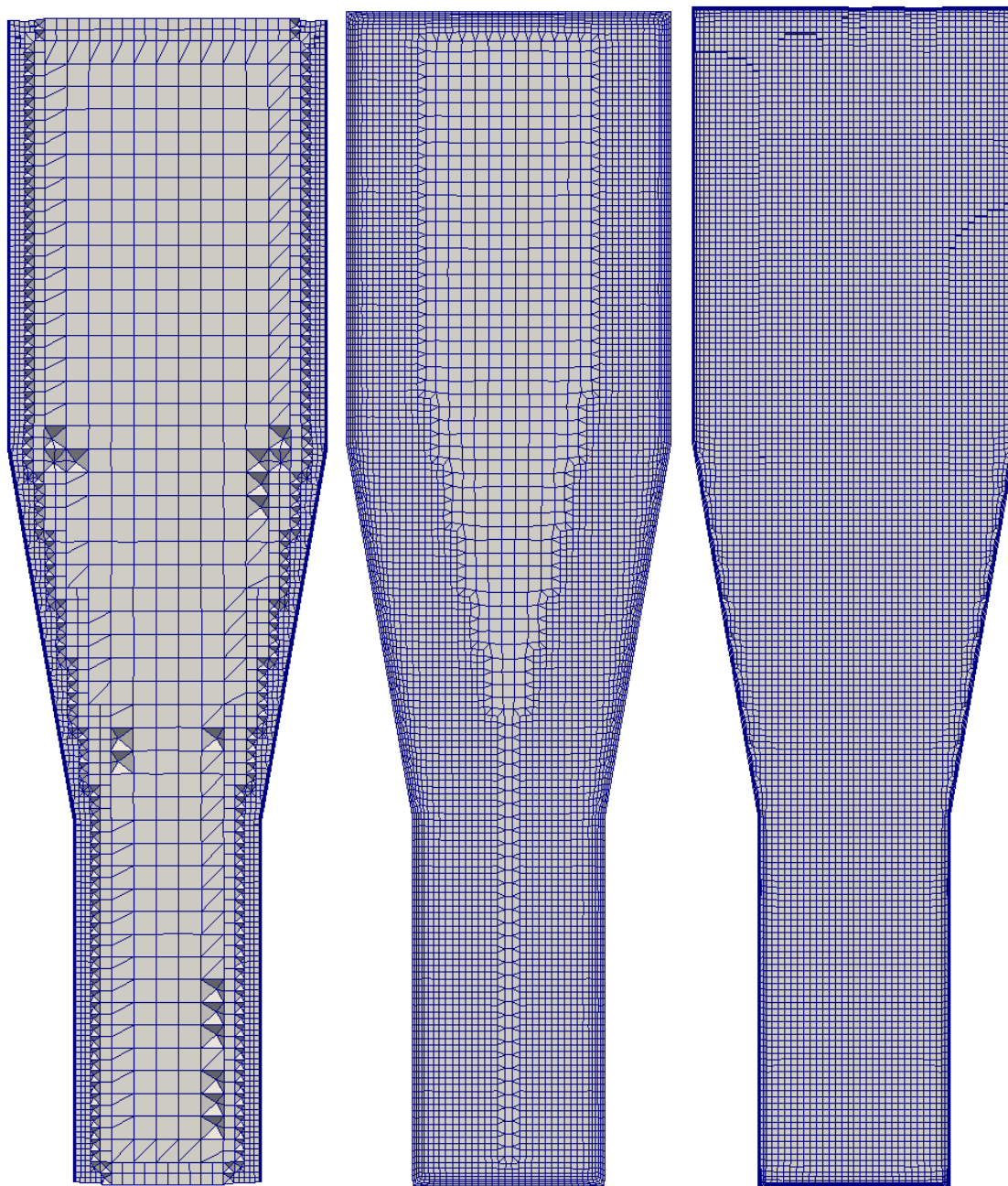


Figure 4.2 Maillages fins (snappyHexMesh, Hexpress Hybrid, cfMesh) générés pour le Cas 2

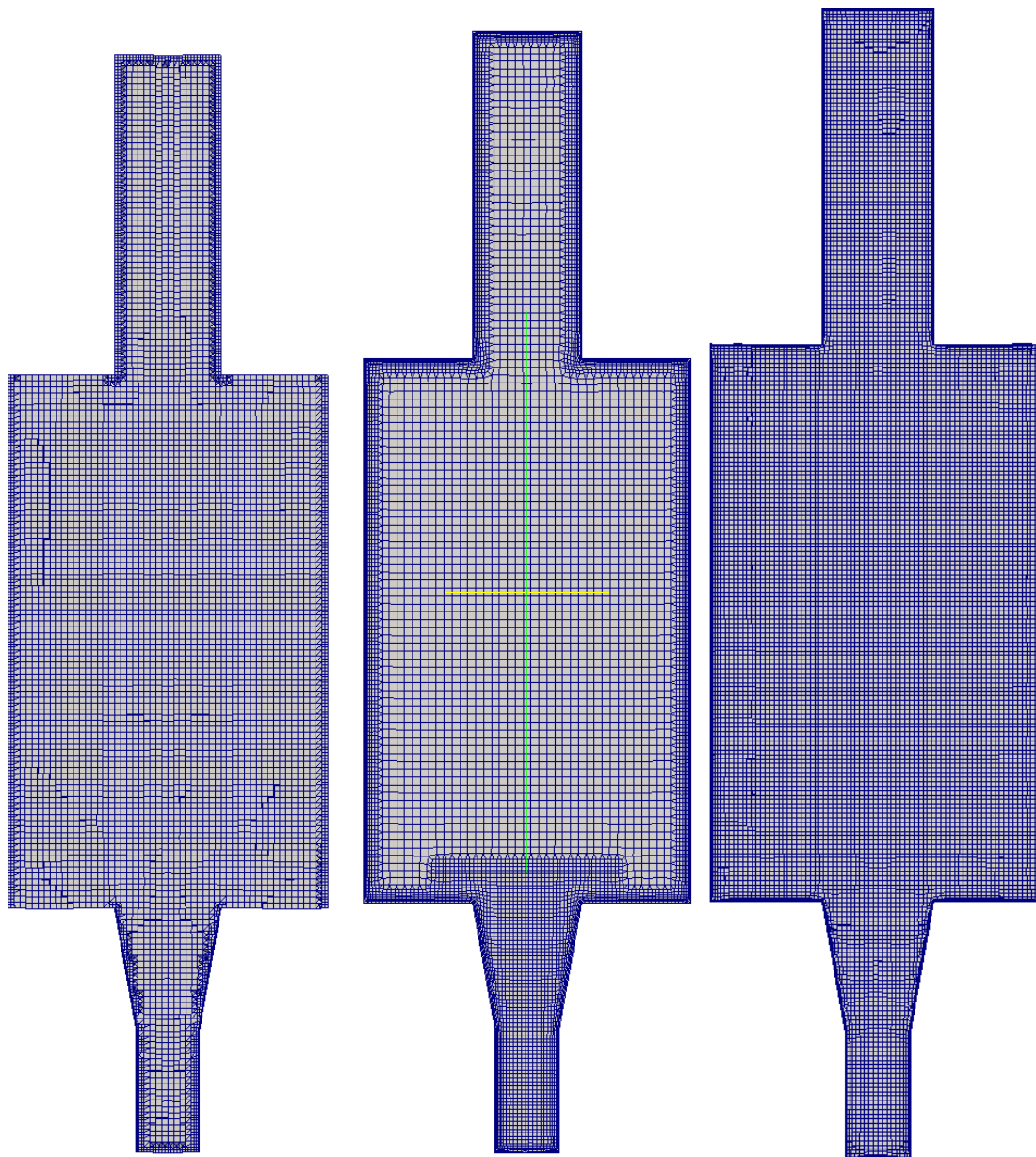


Figure 4.3 Maillages fins (snappyHexMesh, Hexpress Hybrid, cfMesh) générés pour le Cas 3

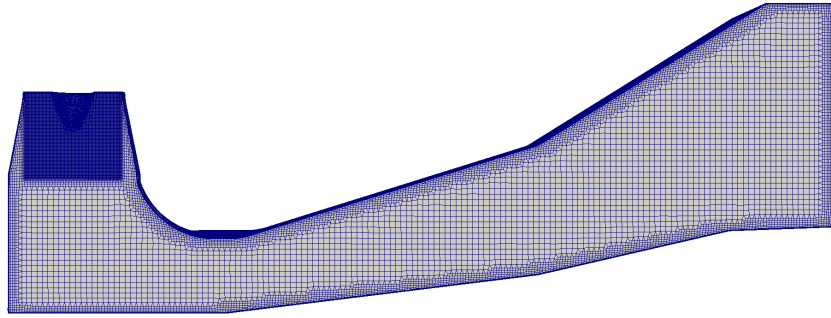


Figure 4.4 Maillage fin généré avec Hexpress Hybrid pour le Cas 4

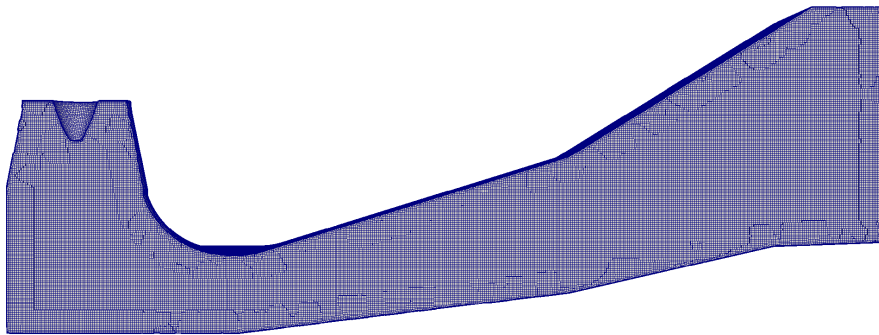


Figure 4.5 Maillage fin généré avec cfMesh pour le Cas 4

4.1.2 Composition des maillages

Les tableaux suivants illustrent les compositions des maillages pour les quatre cas. Nous avons obtenu les données avec l'utilitaire checkMesh. Les données suivantes sont illustrées dans les tableaux : le nombre total de cellules dans le maillage (élément), les cellules hexaédriques (hexa), les cellules tétraédriques (tetra), les cellules prismatiques (prismes) et les cellules polyédriques (poly). Les cellules polyédriques contiennent tous les autres polyèdres incluant les éléments pyramidaux. Pour les trois premiers cas, nous avons comparé les maillages avec ceux générés avec l'utilitaire blockMesh générés par (Nilsson et al., 2009). Pour le dernier cas, nous avons comparé avec le maillage ICEM généré durant les réunions qui eurent lieu durant le cadre des ateliers Turbine-99 (Engdtröm et al., 2001)(Nilsson and Page, 2005).

Tableau 4.1 Composition des maillages pour Cas 1

cas	générateur	éléments	hexa	tetra	prismes	poly	y+
Cas1	blockMesh	57600	57600	0	0	0	24.99
Cas1	snappyHexMesh	8252	6254	0	88	1910	46.77
Cas1	snappyHexMesh	49153	42244	0	616	6293	21.475
Cas1	snappyHexMesh	132226	116074	0	1386	14766	15.31
Cas1	HH	56411	35469	3688	13910	3344	52.48
Cas1	HH	120991	79083	7088	27644	7176	36.61
Cas1	HH	240189	162489	12864	51168	13668	25.85
Cas1	cfMesh	38608	37656	112	560	280	25.81
Cas1	cfMesh	78304	77032	176	704	392	16.98
Cas1	cfMesh	159028	157348	224	896	560	12.12

Tableau 4.2 Composition des maillages pour Cas 2

cas	générateur	éléments	hexa	tetra	prismes	poly	y+
Cas2	blockMesh	96000	96000	0	0	0	23.97
Cas2	snappyHexMesh	60709	55088	0	2092	3094	26.91
Cas2	snappyHexMesh	77746	63634	0	4014	10098	20.71
Cas2	snappyHexMesh	167127	137611	0	9270	20244	13.40
Cas2	HH	95566	68538	2612	21320	3096	3.43
Cas2	HH	190588	139624	5110	39174	6680	2.46
Cas2	HH	379365	309725	8848	49696	11096	30.58
Cas2	cfMesh	94661	93329	280	608	444	28.95
Cas2	cfMesh	190476	189336	152	608	380	21.79
Cas2	cfMesh	388568	386516	280	1120	652	16.63

Tableau 4.3 Composition des maillages pour Cas 3

cas	générateur	éléments	hexa	tetra	prismes	poly	y+
Cas3	blockMesh	176000	176000	0	0	0	24.59
Cas3	snappyHexMesh	74087	56645	0	8956	8456	45.16
Cas3	snappyHexMesh	187504	153256	0	17063	17185	29.05
Cas3	snappyHexMesh	371129	312852	0	29607	28668	23.71
Cas3	HH	184366	158634	1128	20560	4044	45.61
Cas3	HH	337918	291258	1880	36336	8444	93.05
Cas3	HH	690483	593903	3616	75372	17592	60.05
Cas3	cfMesh	172104	168176	344	1720	1004	25.85
Cas3	cfMesh	354628	351328	440	1760	1100	29.38
Cas3	cfMesh	798636	794256	584	2336	1460	33.87

Tableau 4.4 Composition des maillages pour Cas 4

cas	générateur	éléments	hexa	tetra	prismes	poly	y+
Cas4	ICEM	981424	981424	0	0	0	66.7
Cas4	HH	962689	787237	13082	138648	23722	30
Cas4	HH	2007859	1720119	19451	226201	42088	25
Cas4	HH	4048012	3574916	32469	365103	75524	15
Cas4	cfMesh	976844	967799	2834	3144	3067	270
Cas4	cfMesh	2018101	2007877	1280	6336	2608	121
Cas4	cfMesh	4010031	3997972	1318	7620	3121	95

4.2 Discussion des aspects importants des générateurs de maillages

Notre discussion portera sur cinq aspects observés sur les maillages générés avec les trois générateurs de maillage, soit la capture des caractéristiques des géométries, le respect des surfaces géométriques des quatre cas, le contrôle du nombre total d'éléments et grosseur des éléments, la génération et contrôle des couches visqueuses et le contrôle de la qualité des éléments des maillages .

4.2.1 Capture des caractéristiques des géométries

snappyHexMesh La capture des caractéristiques des quatre géométries par le générateur de maillage snappyHexMesh est fonction de la grosseur et de la forme des éléments du maillage initial généré à l'aide de l'outil blockMesh. Pour que l'algorithme de projection de snappyHexMesh capture correctement une arête de la géométrie (voir figure 4.8), le maillage initial blockMesh doit être aligné avec les surfaces à angles droits de la géométrie.

Un test a été effectué pour le Cas 1 sur l'entrée de la géométrie du diffuseur conique. Deux surfaces du maillage initial blockMesh sont coïncidentes avec l'entrée et la sortie de la géométrie. Cela permet de projeter les arêtes du maillage initial sur les courbes, celles à l'entrée et à la sortie. Les images suivantes montrent la géométrie représentée par la couleur verte ainsi que le maillage initial et le maillage projeté (Maillage Snap) représentés en gris. Le Maillage Snap est le maillage résultant de la projection du maillage initial. On peut conclure que capturer les caractéristiques plus complexes de certaines géométrie avec snappyHexMesh nécessite des connaissances avancées de l'algorithme de projection. Le maillage initial doit être optimal pour la géométrie pour laquelle l'on désire générer un maillage. La calibration de blockMesh pour générer le bon maillage initial peut s'avérer difficile.

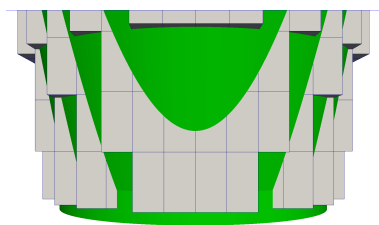


Figure 4.6 Maillage Castellated Non-conforme

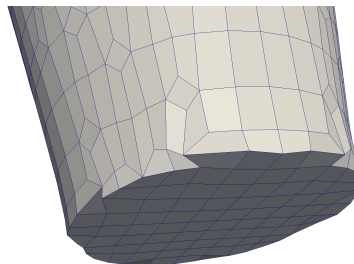


Figure 4.7 Maillage Snap Non-conforme

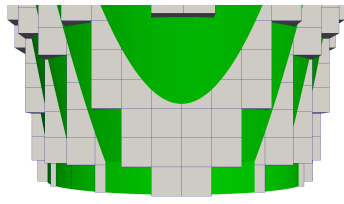


Figure 4.8 Maillage Castellated conforme

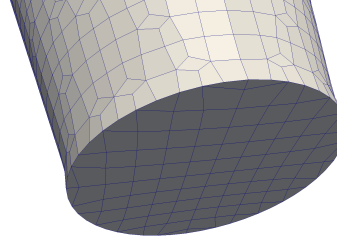


Figure 4.9 Maillage Snap conforme

Hexpress Hybrid Pour que les caractéristiques des quatre géométries soient capturées correctement par Hexpress Hybrid, les différentes surfaces de chaque géométrie doivent être déclarées séparément dans leur fichier STL correspondant. Sinon, l'arête qui sépare deux surfaces ne sera pas capturée.

Un test sur la géométrie du Cas 2 a été effectué avec Hexpress Hybrid. Nous avons modifié le fichier STL de la géométrie en combinant deux surfaces de l'extension à la sortie du diffuseur conique. Les deux surfaces de couleur lime sont combinées comme une seule surface dans le fichier STL (Figure 4.10). Un maillage non conforme est généré, car l'arête entre les deux surfaces est absente (Figure 4.11). En déclarant les deux surfaces séparément dans le fichier STL de la géométrie (Figure 4.12 et Figure 4.13), le maillage généré devient conforme (Figure 4.14).

La modification du fichier STL est un problème, car nous avons modifié les fichiers ligne par ligne. Les fichiers peuvent contenir jusqu'à 100,000 lignes. Pour des géométries complexes, tel le Cas 4, les modifications peuvent devenir très compliquées à implémenter.

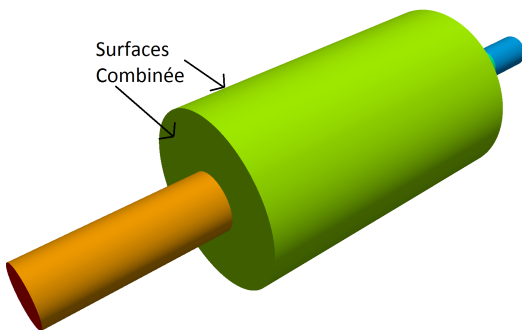


Figure 4.10 Géométrie surface unique sortie lime

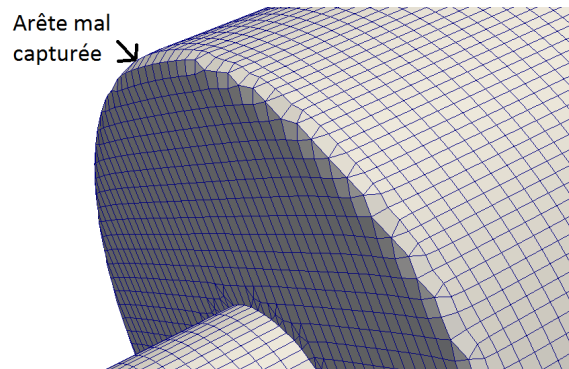


Figure 4.11 Maillage non-conforme

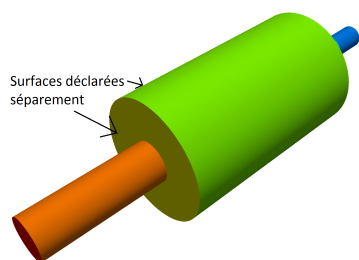


Figure 4.12 Géométrie de la sortie avec 3 surfaces

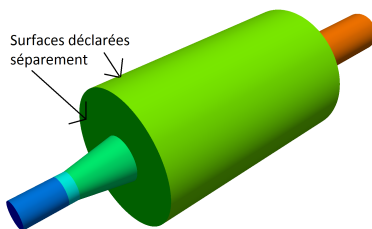
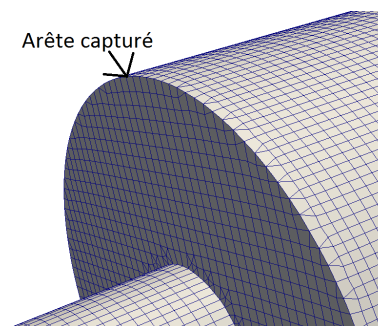


Figure 4.13 Géométrie de la sortie avec 3 surfaces



4.14 Maillage conforme

cfMesh Un traitement similaire doit être aussi effectué sur les fichiers STL pour le générateur de maillage cfMesh, afin qu'il soit en mesure de capturer les caractéristiques des surfaces des géométries des quatre cas. Les surfaces qui ont des angles autour de 90 degrés entre elles doivent être déclarées séparément dans le fichier STL. L'algorithme de cfMesh semble incapable de projeter des éléments sur des arêtes si les 2 surfaces ne sont pas déclarées séparément. Cette étape supplémentaire de modification du fichier STL complique et alourdit le processus. Toutes les modifications aux fichiers ont été faites à la main. Par contre, nous n'avons testé aucun outil capable de modifier des fichiers STL.

4.2.2 Respect des surfaces géométriques des quatre cas

snappyHexMesh Pour être en mesure de générer des maillages avec snappyHexMesh qui respectent les frontières des géométries, la projection du maillage surfacique *Castellated* doit se faire (si possible) de l'extérieur de la géométrie vers les surfaces de la géométrie. Pour créer un maillage *Castellated* qui comprend une grande partie du maillage surfacique à l'extérieur de la géométrie, un même facteur de raffinement doit être utilisé pour toutes les surfaces du maillage *Castellated*. Quand deux raffinements différents sont présents dans le maillage initial généré avec blockMesh, la projection du maillage initial vers la surface peut créer des petits trous dans le maillage *Castellated*. Le problème apparaît quand une partie de la surface de la géométrie qui est maillée n'est pas parallèle à la surface.

Hexpress Hybrid Le générateur de maillage Hexpress Hybrid insère les couches visqueuses en deux étapes. Une a trois couches sont insérées sous le maillage de la géométrie durant la première étape. Ces couches sont insérées sur toutes les surfaces, qu'elles soient une paroi solide, une entrée ou une sortie. Par la suite, chaque couche peut être subdivisée en couche plus petites. Un problème a cependant été identifié. En effet cette première étape peut déformé les frontières des maillages en les rendant non-conformes.

Le test suivant a été effectué sur le Cas 1. Nous avons séparé la couche visqueuses en 3 couches visqueuses pour l'entrée, les murs et la sortie (Figure 4.16). La figure 4.15 montre que la courbe entre l'entrée et les parois de la géométrie est plus grande que l'entrée originale. En diminuant le facteur de diffusion et en augmentant le facteur de raffinement, le maillage devient conforme (Figure 4.18). Si par contre la couche n'est pas divisée entre les différentes surfaces, le maillage respecte les frontières de la géométrie.

cfMesh L'algorithme du générateur de maillage cfMesh peut détecter si la qualité ou la surface peut être respectée pour un maillage donné. Une option est disponible dans le fichier utilisé par cfMesh pour tester si la surface du maillage respecte les frontières de la géométrie. Nous n'avons pas eu besoin d'utiliser cette option. Si la taille de l'élément n'est pas optimisée, la projection des éléments proches de la surface ne fonctionne pas. La taille peut être optimisée en considérant le volume total de la géométrie et le nombre total d'éléments désirés dans le maillage. L'utilisation de cfMesh pour certains types de géométries peut donner des maillages non-conformes. L'algorithme a des problèmes pour capturer les caractéristiques quand la taille de l'élément n'est pas bien choisie. Une stratégie de calcul pour la taille de

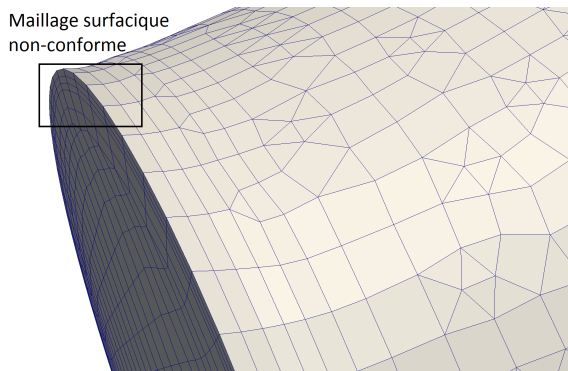


Figure 4.15 Maillage entrée-parois Cas 1 non-conforme

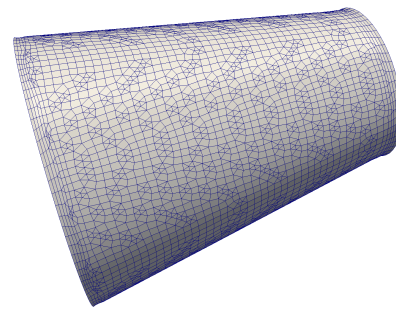


Figure 4.16 Maillage Hexpress Hybrid Cas 1 non-conforme

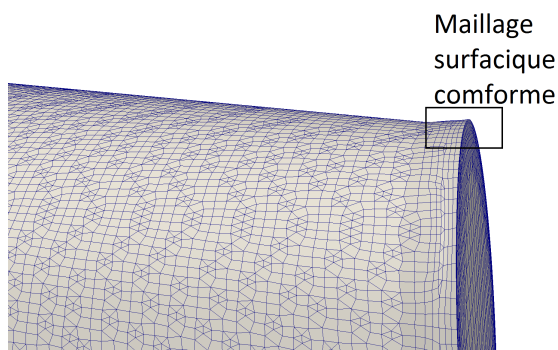


Figure 4.17 Maillage entrée-parois Cas 1 conforme

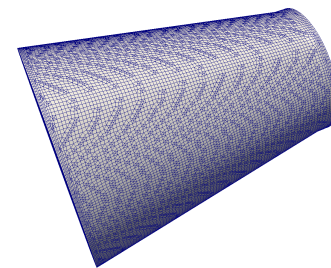


Figure 4.18 Maillage Hexpress Hybrid Cas 1 conforme

l'élément sera recommandée comme travail futur.

4.2.3 Contrôle du nombre total d'éléments et grosseur des éléments

snappyHexMesh Le générateur de maillage snappyHexMesh ne contrôle pas directement le nombre total des éléments générés pour un maillage. Par contre, le nombre maximum d'éléments pour un maillage peut être spécifié. Une autre option est de limiter le nombre de cellules par niveau de raffinement. Cette méthode peut être problématique, si le nombre de cellules requises pour le raffinement est sous-estimé. Pour les trois cas, nous avons raffiné le maillage initial blockMesh pour l'étude de convergence. Cette approche était la plus simple à implanter et permet d'obtenir le maillage le plus uniforme de façon robuste.

Hexpress Hybrid Le nombre total d'éléments générés par Hexpress Hybrid pour les maillages des quatre cas dépend de trois facteurs : la longueur spécifiée pour l'élément initial, le raffinement au niveau des surfaces et le nombre de couches visqueuses spécifié. La longueur spécifiée contrôle le nombre des éléments du maillage initial avant le raffinement. Pour les quatre cas, nous avons ajusté progressivement la longueur des éléments pour permettre de générer des maillages de plus en plus raffinés. Cette méthode n'est pas optimal car elle demande beaucoup d'essais avant d'avoir la bonne taille du maillage.

cfMesh L'algorithme du générateur de maillage cfMesh permet de spécifier la longueur de l'élément initial et la longueur maximale à la surface. Le contrôle du nombre total d'éléments pour les maillages des quatre cas est effectué en spécifiant la longueur de l'élément et le nombre total des couches. Pour le Cas 3, nous avons utilisé un cylindre pour définir une zone est ainsi faciliter le raffinement à l'entrée du diffuseur. Le nombre total d'éléments peut être contrôlé quand il n'y a pas de zone de raffinement spécifiées. Si une zone de raffinement est introduite, le contrôle devient plus difficile.

4.2.4 Génération et contrôle des couches visqueuses

snappyHexMesh L'algorithme du générateur de maillage snappyHexMesh génère les couches visqueuses en extrudant les faces du maillage surfacique. Les couches générées pour les trois cas dépendent de la qualité des faces du maillage surfacique. L'épaisseur maximale des couches visqueuses est une fonction directe de l'élément le plus petit du maillage, ce qui ne permet pas de contrôler de façon séparée la taille des éléments dans les couches visqueuses et le raffinement global du maillage. La génération des couches visqueuses est la partie la moins robuste de l'algorithme de snappyHexMesh. La dépendance à la qualité du maillage de surface rend le processus très instable. Pour le Cas 4, les couches visqueuses étaient incomplètes et de mauvaise qualité.

Hexpress Hybrid Les couches sont insérées automatiquement en deux étapes par l'algorithme du générateur de maillage Hexpress Hybrid. La première étape consiste à insérer des couches sous toutes les surfaces. Un certain volume est réservé pour l'insertion des couches. L'épaisseur totale des couches durant la première étape ne peut pas être contrôlée. Ensuite chaque couche est divisée en spécifiant le nombre de couches et le facteur d'expansion. Pour

éviter que les couches visqueuses déforment les maillages, le facteur de diffusion entre les éléments doit être proche de l'unité. Le contrôle des couches limites dans Hexpress Hybrid est difficile à implémenté.

cfMesh Pour traiter les effets visqueux près des parois solides, les couches sont insérées par l'algorithme du générateur de maillage cfMesh après que le maillage interne soit généré. Chaque surface a sa propre couche visqueuse et les couches sont découplées entre elles pour différentes surfaces. Pour les Cas 2 et 3 les figures 4.19 et 4.20 montrent que les couches ont des ondulations. Les ondulations peuvent être éliminées en utilisant une option d'optimisation, mais cela introduit un autre problème. Les intersections de deux couches visqueuses créent des éléments difformes aux jonctions entre les surfaces ou dans les coins.

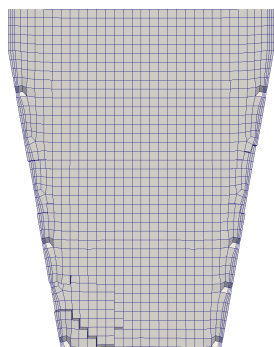


Figure 4.19 Maillage cfMesh Cas 2 couches visqueuses

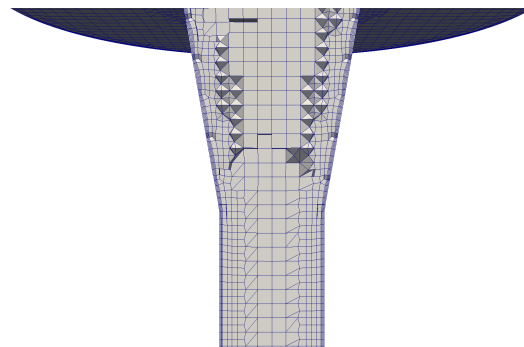


Figure 4.20 Maillage cfMesh Cas 3 couches visqueuses

4.2.5 Contrôle de la qualité des éléments des maillages

snappyHexMesh Le contrôle de la qualité par snappyHexMesh des maillages est effectué durant les trois étapes Castellated, Snap et Addlayer. Pour chaque maillage, divers tests sont faits sur les éléments. Les paramètres qui contrôlent la qualité peuvent être modifiés pour chaque maillage. Le nombre total d'itérations où le paramètre de qualité est calculé peut être également modifié. La calibration des paramètres de qualité est très complexes et peut

impacté le maillage final. Les informations disponibles sur l'impact de chaque paramètre sur un maillage donné ne sont pas toujours très claires.

Hexpress Hybrid Le contrôle de la qualité des éléments est interne pour Hexpress Hybrid. Un contrôle de qualité est complété durant la génération du maillage pour s'assurer qu'aucun élément avec un volume négatif n'est généré. Les éléments avec des volumes négatifs sont éliminés. L'insertion de couches très concentrées peut créer des éléments ayant des volumes négatifs. Un lissage est effectué sur le maillage pour éliminer les éléments qui ont des volumes négatifs. Aucune modification n'est permise des paramètres de qualité. Le contrôle fonctionne bien pour générer des maillages de bonne qualité.

cfMesh Le contrôle de la qualité est aussi effectué à l'interne par cfMesh. Aucun élément avec un volume négatif n'est permis durant la génération du maillage. Le volume des éléments est calculé après chaque étape. Les éléments avec des volumes négatifs sont éliminés et remplacés par de nouveaux éléments. Une optimisation des positions des arêtes est effectuée pour réaligner les nouveaux éléments. Le contrôle de qualité dans cfMesh est efficace en générant des maillages de qualité et permettant à l'utilisateur de se concentrer sur les paramètres qui impactent la génération de maillage.

4.3 Mesures de qualité des maillages pour les quatre cas

Cette section présente et discute des statistiques de volume, de forme et du facteur d'expansion pour chacun des cas pour le maillage de niveau 3. Les résultats complets sont en annexe. Les résultats sont présentés en histogramme pour faciliter la comparaison des résultats obtenus avec chacun des 3 générateurs de maillage. Pour permettre de comparer les histogrammes des volumes et des facteurs d'expansions entre les différents maillages, nous avons normalisé l'axe des x. Les valeurs minimum et maximale des volumes et des ratios sont indiqués sous l'axe.

4.3.1 Cas 1

Les distributions des valeurs pour le volume pour les maillages fins pour le Cas 1.

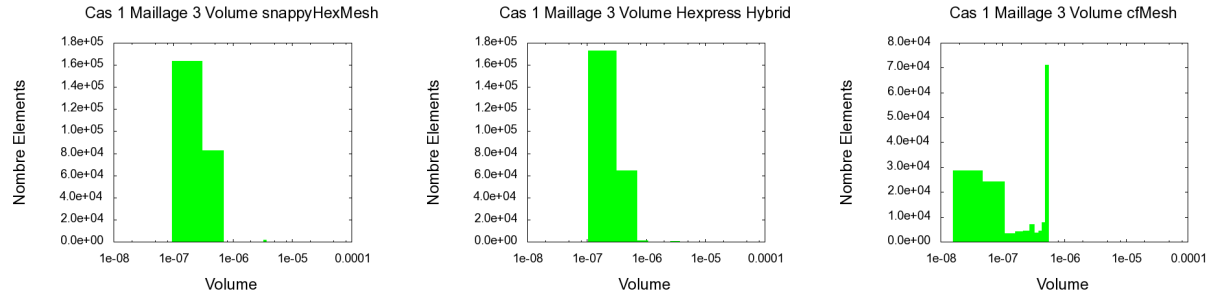


Figure 4.21 Cas 1 Distribution Volume Maillages fins

Les distributions des valeurs pour la forme pour les maillages fins pour le Cas 1.

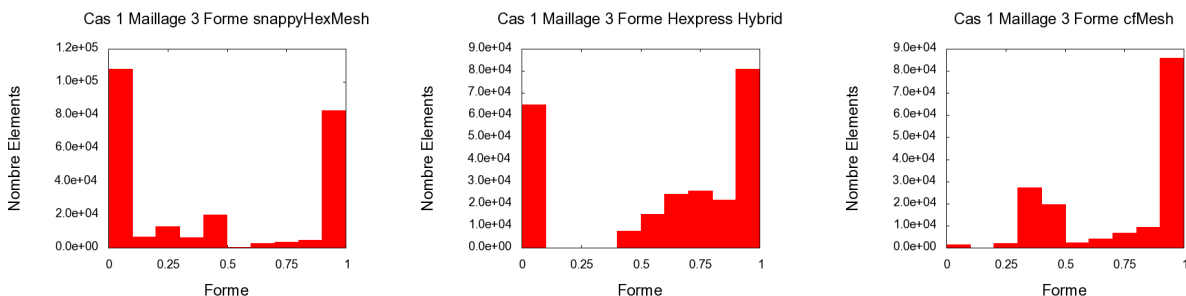


Figure 4.22 Cas 1 Distributions Forme Maillages fins

Les distributions des valeurs pour le ratio pour les maillages fins pour le Cas 1.

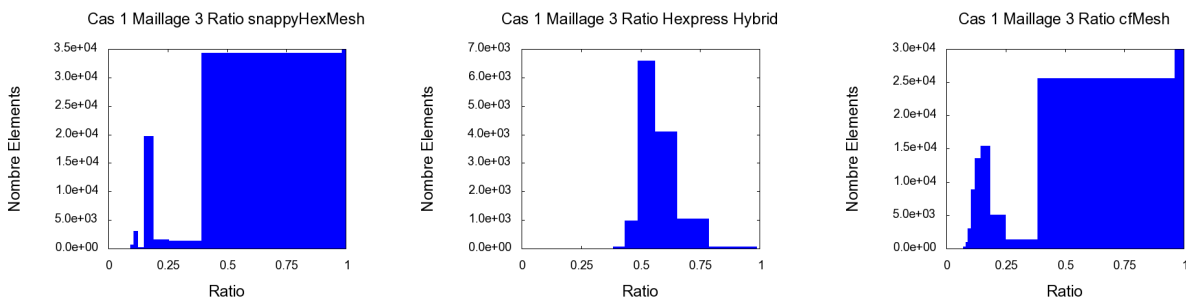


Figure 4.23 Cas 1 Distribution Ratio Maillages fins

4.3.2 Discussion sur le Cas 1

snappyHexMesh Comparé aux deux autres générateurs de maillage, snappyHexMesh génère plusieurs types d'éléments différents. Les polyèdres irréguliers sont créés lorsque le maillage Castellated Mesh est projeté sur la surface de la géométrie. Les distributions des valeurs de volume indiquent une concentration de très petits volumes. Les distributions des valeurs pour la forme montrent deux concentrations près des valeurs zéro et un. Les distributions des valeurs pour ratio montrent que les valeurs sont concentrées entre 0 et 3.25.

L'utilisation de snappyHexMesh pour générer des maillages pour la première géométrie devient plus difficile à mesure que les maillages sont raffinés. Le problème vient de la difficulté à générer des couches visqueuses aux parois de qualité. Les éléments aux parois sont souvent de mauvaise qualité.

Hexpress Hybrid Les trois maillages générés pour le Cas 1 contiennent le plus d'éléments comparés aux maillages générés avec snappyHexMesh et cfMesh. Les distributions des valeurs de volume montrent que les valeurs sont concentrées entre 0 et $8.67e-07$. Cela montre que les volumes sont uniformes à travers la géométrie. Les distributions des valeurs de formes montrent qu'une grande partie des éléments sont bien formés avec des valeurs entre 0.5 et 1. Les distributions des valeurs de ratio montrent que les ratios sont plus petit comparé aux maillages générés avec snappyHexMesh et cfMesh. Pour Hexpress Hybrid, la difficulté principale pour le Cas 1 fut la séparation des trois couches limites pour les trois surfaces à l'entrée, à la sortie et sur les parois.

cfMesh La géométrie du Cas 1 a causé des difficultés au générateur de cfMesh. On a été incapable de générer un maillage qui a convergé avec à peu près le même nombre d'éléments que le maillage de référence généré avec blockMesh. Les trois maillages ont approximativement la moitié des éléments comparés à ceux générés avec Hexpress Hybrid. Les distributions des valeurs de volume montrent que les trois maillages de cfMesh contiennent plus d'éléments qui ont des volumes très petits comparé aux maillages Hexpress Hybrid ou blockMesh. En effet, pour des raisons de stabilité numérique, nous avons opté pour des maillages avec moins d'éléments. Lorsque le maillage 1 avait le même nombre d'éléments, les maillages générés pour le Cas 1 montrent qu'une grande partie des éléments hexaédriques et tétraédriques ont une métrique de forme plus grande que 0.5, surtout pour les maillages 2 et 3. L'algorithme de cfMesh vérifie qu'aucun élément ayant un volume négatif n'est généré et qu'aucun élément n'est renversé.

4.3.3 Cas 2

Les distributions des valeurs pour le volume pour les maillages fins pour le Cas 2.

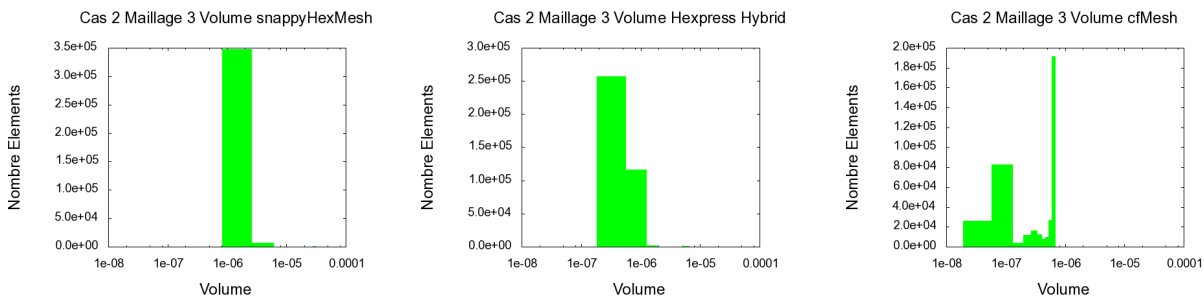


Figure 4.24 Cas 2 Distribution Volume Maillages fins

Les distributions des valeurs pour la forme pour les maillages fins pour le Cas 2.

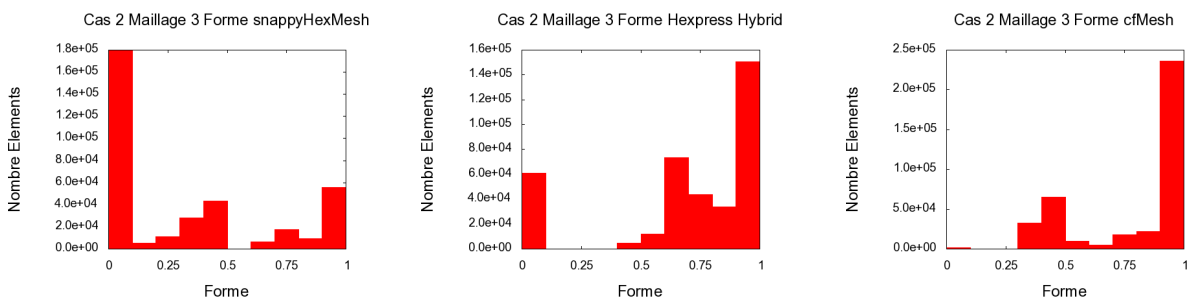


Figure 4.25 Cas 2 Distribution Forme Maillages fins

Les distributions des valeurs pour le ratio pour les maillages fins pour le Cas 2.

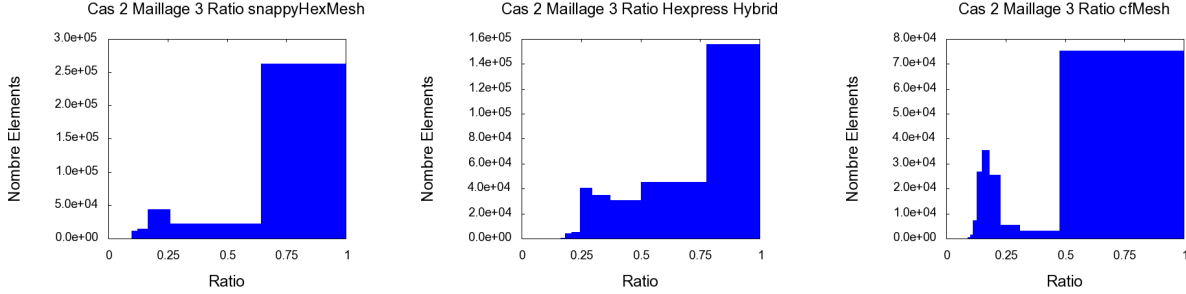


Figure 4.26 Cas 2 Distribution Ratio Maillages fins

4.3.4 Discussion sur le Cas 2

snappyHexMesh Les maillages pour le Cas 2, sont composés majoritairement d'éléments polyédriques autres que des hexaèdres. La présence des éléments polyédriques cause des difficultés pour la stabilité des solutions numériques. Les polyèdres irréguliers sont situés dans la section de la géométrie du diffuseur conique. La distribution des valeurs de volumes pour le maillage 3 (Figure 4.2) montrent que la majorité des éléments sont très petits. La distribution des volumes des éléments hexaédriques et tétraédriques pour le Cas 2, est concentrée autour de valeurs de volumes très petits pour les maillages 2 et 3. Les trois distributions indiquent que la grosseur totale des couches visqueuses diminue à mesure que les maillages sont raffinés. Les distributions de facteurs de forme pour les éléments hexaédriques et tétraédriques montrent pour les trois maillages des valeurs proches de zéro. Cela indique qu'une grande partie des éléments sont déformés. La distribution des valeurs des ratios montre des valeurs très élevées pour les maillages 1 et 2. Pour le maillage 3, les valeurs sont plus petites. Les maillages 1 et 2 ont une grande partie d'élément qui sont très minces, cela peut expliquer les oscillations qui sont présentes dans les solutions RANS.

Hexpress Hybrid Les trois maillages ont une proportion plus importante de prismes que ceux générés avec cfMesh. Le raccordement des couches visqueuses au maillage intérieur utilise une grande quantité d'éléments prismatiques. Les distributions des valeurs des volumes des éléments hexaédriques et tétraédriques pour les trois maillages montrent une concentration

élevée de petits volumes. Les distributions des valeurs de forme montrent deux concentrations, une avec des valeurs proches de zéro et une autre avec des valeurs autour de 1. Ces distributions indiquent que les maillages sont composés majoritairement d'éléments bien formés. mais les solutions obtenues avec les trois maillages ne converge pas toutes. Les distributions des ratios pour les maillages 1 et 2 montrent que les valeurs entre zéro et 94. Pour le maillage 3, les valeurs varient entre zéro et 4.6. Comme nous le verrons au chapitre 5, Nous avons obtenus une solution RANS avec le maillage 3 qui convergent vers les valeurs expérimentales (voir chap.5). Les solutions RANS obtenues avec les maillages 1 et 2 s'écartent des valeurs expérimentales (voir chap.5).

cfMesh Les trois maillages sont composés principalement d'éléments hexaédriques. Cette composition peut être vue dans les distributions des valeurs de volumes des éléments hexaédriques et tétraédriques. Les distributions des valeurs des volumes des éléments hexaédriques et tétraédriques pour les trois maillages montrent deux concentrations, de petits volumes et de grands volumes. Pour les distributions des facteurs de formes, les valeurs sont principalement situées entre 0.5 et 1.0. Les distributions des valeurs des ratios des arêtes pour les trois maillages sont très similaires. Les valeurs se situent entre proche de zéro et 10.

4.3.5 Cas 3

Les distributions des valeurs pour le volume pour les maillages fins pour le Cas 3.

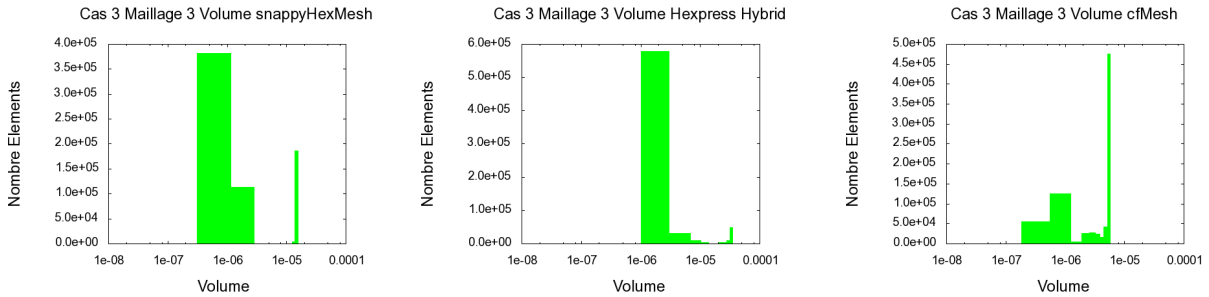


Figure 4.27 Cas 3 Distribution Volume Maillages fins

Les distributions des valeurs pour la forme pour les maillages fins pour le Cas 3.

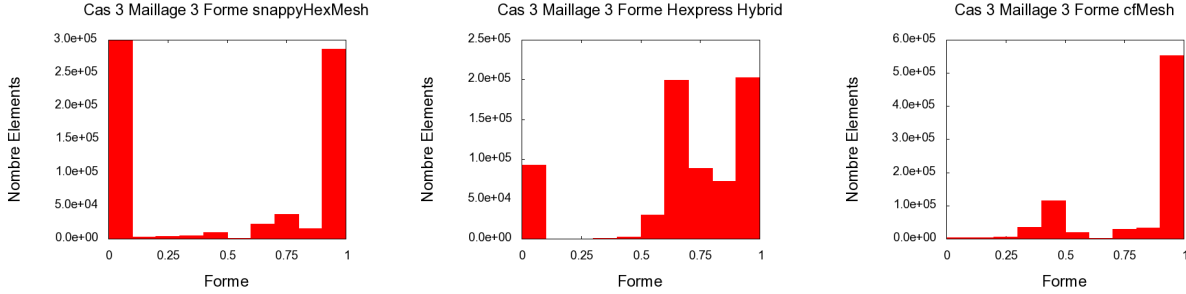


Figure 4.28 Cas 3 Distribution Forme Maillages fins

Les distributions des valeurs pour le ratio pour les maillages fins pour le Cas 3.

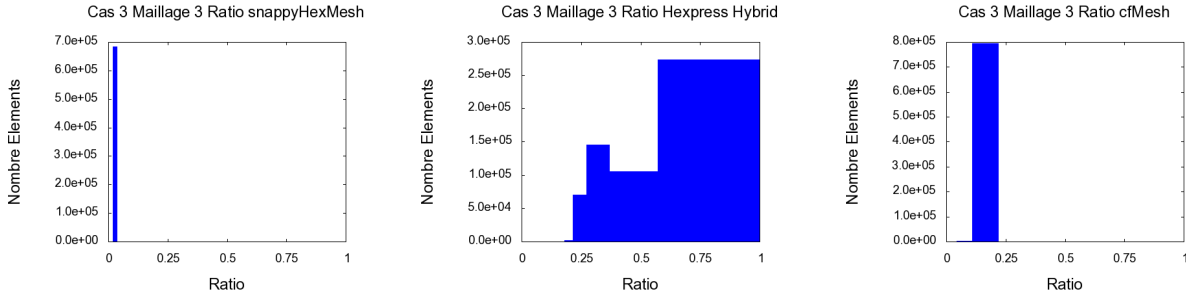


Figure 4.29 Cas 3 Distribution Ratio Maillages fins

4.3.6 Discussion sur le Cas 3

snappyHexMesh Les trois maillages générés pour le Cas 3 sont composés d'éléments hexaédriques et polyédriques. Les éléments polyédriques composent vingt-cinq pour cent des éléments de ces maillages. Les distributions des valeurs de volumes pour les trois maillages sont concentrées autour de petits volumes. Ces petits volumes influencent directement l'épaisseur totale des couche visqueuses. L'extension à la sortie de la géométrie a causé des problèmes au mailleur snappyHexMesh pour créer des couches visqueuses sur toutes les parois de la

géométrie. Les distributions des valeurs de forme montrent que les valeurs sont situées aux deux extrémités proches de zéro et un. Les valeurs des forme montrent des concentrations de deux types d'éléments, des éléments déformés avec une valeur proche de zéro et des éléments parfaitement hexaédriques avec une valeur de un.

Hexpress Hybrid La composition des maillages pour le Cas 3 est divisée principalement entre des hexaèdres et des tétraèdres. Les distributions des volumes pour les trois maillages sont concentrées autour des valeurs les plus petites. Les distributions des facteurs de forme montrent que les valeurs des éléments se situent entre 0.5 et 1. Les distributions des valeurs des ratios (Figure 4.27) montrent que le maillage 3 a la valeur la plus petite comparé aux maillages snappyHexMesh et cfMesh.

cfMesh La composition des trois maillages pour le Cas 3 est majoritairement composée d'hexaèdres avec des petits concentrations de tétraèdres, prismes et pyramides. Pour le Cas 3, les distributions des valeurs de volumes des éléments hexaédriques et tétraédriques sont concentrées autour de valeurs plus élevées, avec une petite concentration de petit volumes. Les distributions des valeurs de forme des éléments hexaédriques et tétraédriques sont concentrées sur les valeurs de 0.5 et 1. Les distributions des valeurs des ratios sont concentrées sur les petits ratio. Le maillage 1 a le même ratio que le maillage blockMesh.

4.3.7 Cas 4

Les distributions des valeurs pour le volume pour les maillages fins pour le Cas 4.

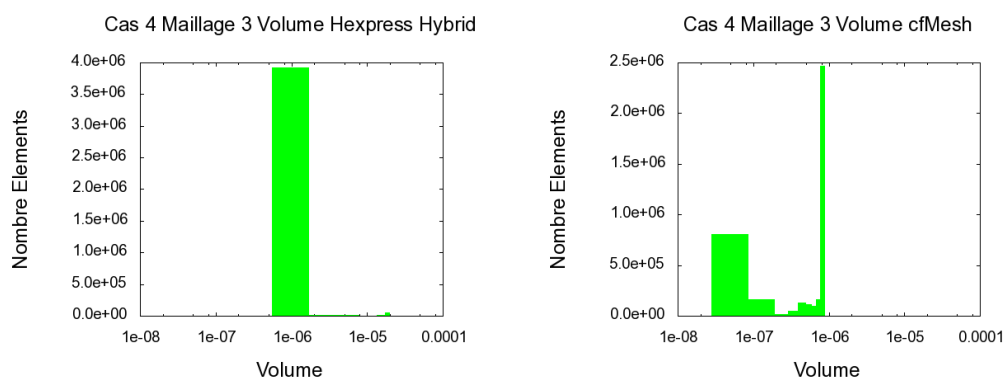


Figure 4.30 Cas 4 Distribution Volume Maillages fins

Les distributions des valeurs pour la forme pour les maillages fins pour le Cas 4.

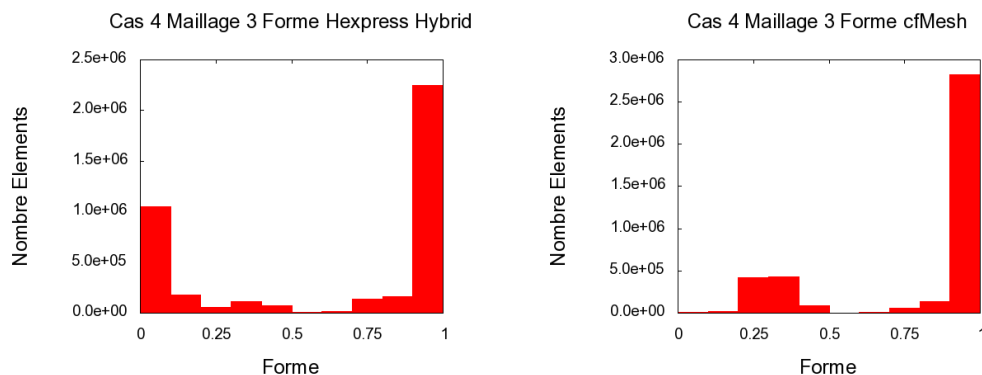


Figure 4.31 Cas 4 Distribution Forme Maillages fins

Les distributions des valeurs pour le ratio pour les maillages fins pour le Cas 4.

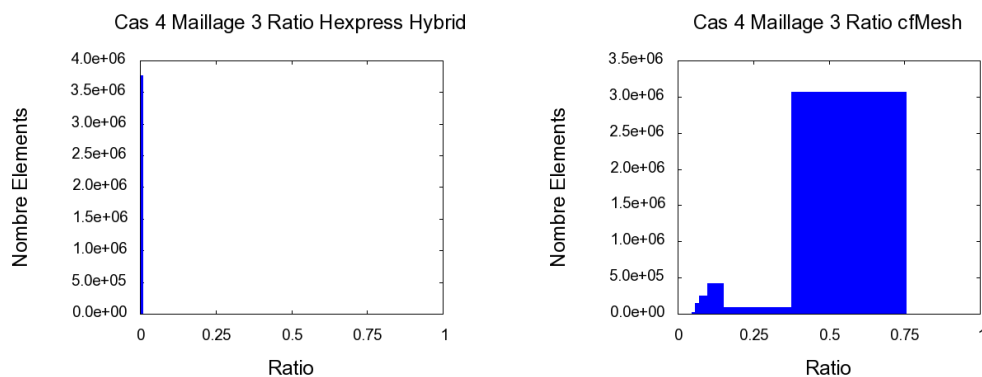


Figure 4.32 Cas 4 Distribution Forme Maillages fin

4.3.8 Discussion sur le Cas 4

Hexpress Hybrid Les trois maillages sont composées d'hexaèdres et de prismes comparés à ceux générés avec cfMesh. Les prismes sont utilisés pour raccorder les couches près des frontières du maillage intérieur. La distributions des valeurs de volumes du maillage 1 montre une concentration d'éléments avec des volumes plus grands que ceux du maillage généré avec

ICEM. Cette différence de volume va limiter l'épaisseur totale des couches visqueuses. Les maillages 2 et 3 ont des éléments avec des volumes similaires à ceux du maillage ICEM. Avec des volumes plus petits, on espère générer plus de couches visqueuses. Cette distribution très uniforme des volumes est créée, car nous avons employé une zone de raffinement à l'entrée du diffuseur. Les distributions de valeurs de forme indiquent des concentrations soit avec un facteur unitaire ou très proche de zéro. Les distributions des ratios pour les maillages sont sept fois plus élevées que ceux du maillage ICEM de référence.

cfMesh Les trois maillages sont composés majoritairement d'hexaèdres comparés à ceux générés avec Hexpress Hybrid. Les distributions des valeurs des volumes pour le maillage 1 montrent une grande concentration de volume plus petits comparé au maillage de ICEM. Les distributions des valeurs des volumes montrent une concentration d'éléments avec des petits volumes pour les maillages 2 et 3. Pour les trois maillages, la taille des éléments diminue l'épaisseur totale des couches visqueuses. Si les couches visqueuses ne sont pas assez épaisses, la turbulence de l'écoulement ne sera pas modélisée correctement. Les distributions des valeurs de forme du maillage de ICEM montrent une distribution uniforme, comparée aux distributions des valeurs de forme des maillages de cfMesh. Cette distribution montre que l'algorithme de cfMesh optimise les formes des éléments, mais crée une petite quantité d'éléments de qualité inférieurs. Ces éléments affectent les solutions numériques RANS dans la capture de la turbulence. La distribution pour les valeurs de ratios pour le maillage 1 montre des valeurs très élevées comparées avec la distribution du maillage ICEM. Ce grand écart montre que le maillage 1 comprend des éléments très minces. Des erreurs sont introduites pour les quantités d'ingénierie à cause des éléments très minces. Les distributions des valeurs de ratio des maillages 2 et 3 montrent des valeurs de même magnitude que ceux du maillage ICEM.

CHAPITRE 5 SOLUTIONS NUMÉRIQUES

5.1 Résultats des solutions RANS pour les Cas 1,2 et 3

Les quantités suivantes ont été calculées pour les solutions RANS obtenues avec des MCCP pour les Cas 1,2 et 3.

Tableau 5.1 Quantités Cas 1-3

Quantité	Description
U	Vitesse axiale normalisée
W	Vitesse tangentielle normalisée
k	Énergie cinétique normalisée
C_p	Coefficient de pression récupérée pariérale
ζ_1	Coefficient de perte d'énergie entre la sortie et l'entrée
ζ_2	Coefficient de perte d'énergie entre la position 405 mm et l'entrée

Les quantités illustrant les vitesses U , W et l'énergie cinétique k pour les solutions RANS obtenues avec les maillages générés avec les trois générateurs de maillage (snappyHexMesh, Hexpress Hybrid et cfMesh) ont été tracées en modifiant les graphiques obtenus par (Nilsson et al., 2009). Les quantités ont été comparées avec les quantités obtenues par (Nilsson et al., 2009) et les résultats expérimentaux de (Clausen et al., 1993). Les résultats complets des solutions RANS peuvent être consultés à l'annexe 2.

5.2 Cas 1

Le tableau 5.2 illustre le coefficient de perte d'énergie pour les différents maillages pour le Cas 1.

Tableau 5.2 Quantités d'ingénierie - Cas 1

Cas	Générateur	Type de maillage	Nombre Éléments	ζ_1	ζ_2
Cas1	blockMesh	MMBS	57000	0.303792	0.334384
Cas1	snappyHexMesh	MCCP	8252	0.319769	0.341092
Cas1	snappyHexMesh	MCCP	49153	0.310955	0.346621
Cas1	snappyHexMesh	MCCP	132226	0.303662	0.355122
Cas1	Hexpress	MCCP	56411	0.336812	0.359527
Cas1	Hexpress	MCCP	120991	0.324904	0.341338
Cas1	Hexpress	MCCP	240189	0.314867	0.335006
Cas1	cfMesh	MCCP	38608	0.311975	0.375191
Cas1	cfMesh	MCCP	78304	0.31368	0.389042
Cas1	cfMesh	MCCP	159028	0.352312	0.450141

Les six graphiques suivants illustrent les vitesses U , W et l'énergie cinétique k pour les solutions RANS obtenues avec les différents maillages pour le Cas 1. Les quantités correspondent au plan XY et à la position $z=405$ mm (voir figure 3.7).

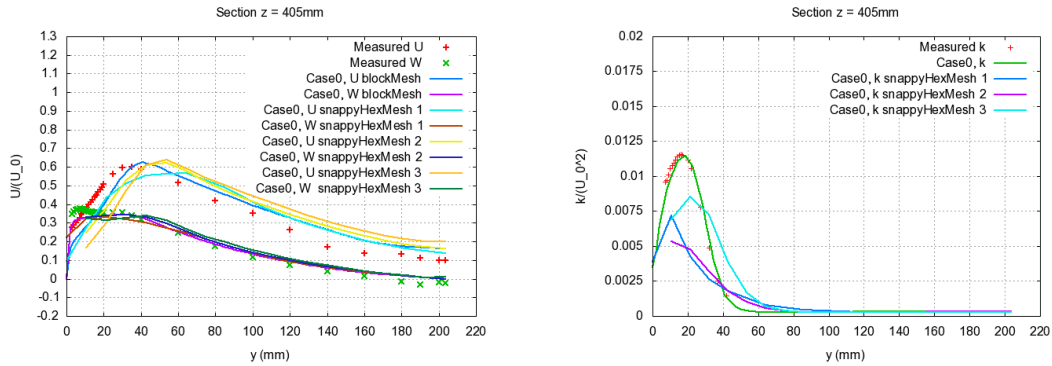


Figure 5.1 Cas 1 Maillages snappyHexMesh Vitesse et Énergie cinétique turbulente

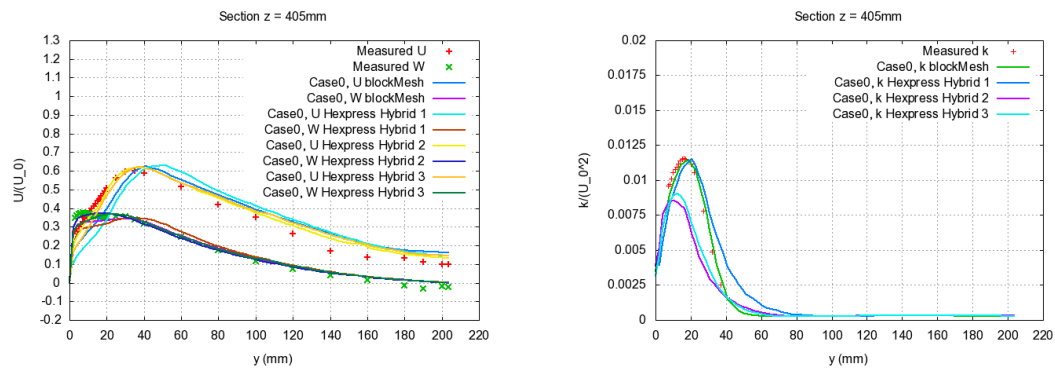


Figure 5.2 Cas 1 Maillage Hexpress Hybrid Vitesse et Énergie cinétique turbulente

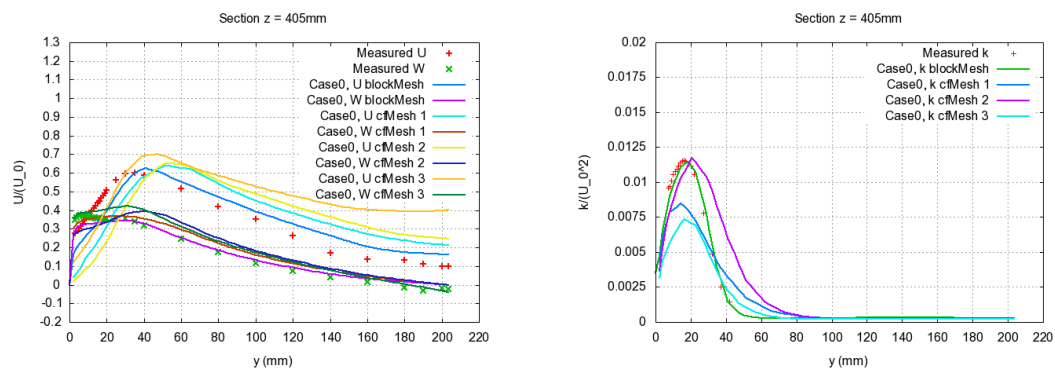


Figure 5.3 Cas 1 Maillage cfMesh Vitesse et Énergie cinétique turbulente

Les courbes suivantes illustre le coefficient de pression récupéré pariétale pour les trois maillages pour le Cas 1.

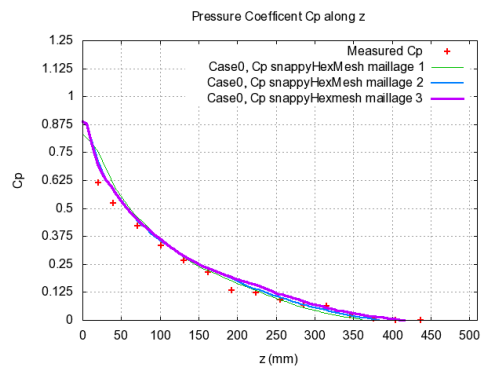


Figure 5.4 Cas 1 Maillages snappyHexMesh C_p

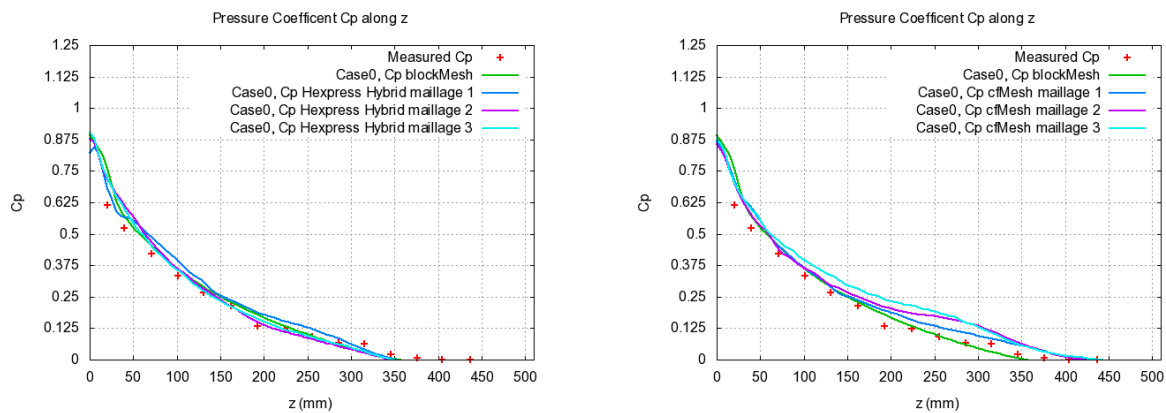


Figure 5.5 Cas 1 Maillages Hexpress Hybrid et cfMesh C_p

5.3 Convergence solution numérique (Cas 1)

Pour le Cas 1, nous avons regardé les courbes des résidus des équations pour les maillages les plus fins (maillage 3). Le nombre d'itérations était de 5000. Les résidus pour les trois maillages sont tous similaires. Les solutions convergent bien sur les 3 maillages, mais la convergence est plus rapide pour les maillages générés avec snappyHexMesh et Hexpress Hybrid comparé à la convergence sur le maillage cfMesh.

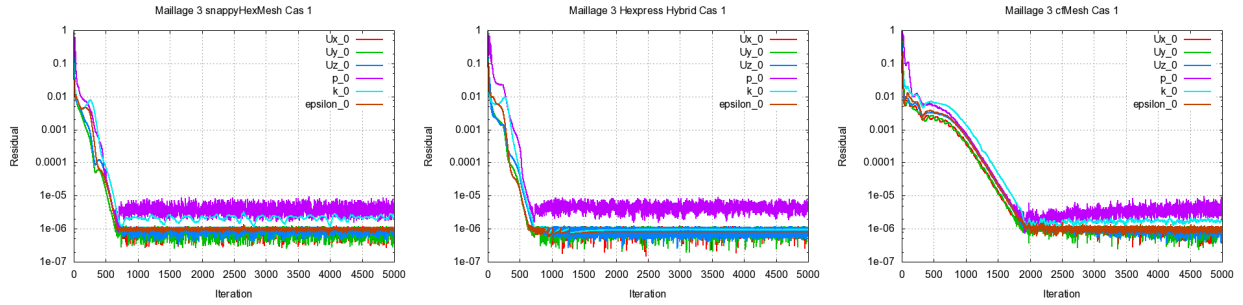


Figure 5.6 Cas 1 courbes de convergence maillages fin

5.3.1 Discussion solutions numériques Cas 1

snappyHexMesh Les vitesses U et W des solutions numériques RANS obtenues avec les trois maillages pour le Cas 1, montre qu'en raffinant les maillages, les solutions s'éloignent des résultats expérimentaux. Cela est probablement dû à la diminution totale de l'épaisseur des couches visqueuses entre le maillage 1 et les maillages 2 et 3. La diminution de l'épaisseur totale des couches visqueuses fait en sorte que les conditions à la surface du diffuseur conique ne sont pas imposées correctement. L'énergie cinétique de turbulence des solutions numériques RANS est sous-estimée pour les maillages 2 et 3. Le maillage 1 capture en gros le phénomène de turbulence. Cette différence probablement est aussi due à la diminution totale de l'épaisseur des couches visqueuses. Les valeurs de ζ_1 et ζ_2 pour les trois maillages sont proche des valeurs obtenues avec le maillage blockMesh. La courbe de pression C_p montre une bonne correspondance avec les valeurs expérimentales.

Hexpress Hybrid Les vitesses U et W des solutions numériques RANS obtenues avec les trois maillages pour le Cas 1 sont proches des valeurs obtenues avec le maillage blockMesh. Les trois maillages semblent bien capturer le phénomène de turbulence. La solution obtenue pour l'énergie cinétique pour le maillage 1 est proche de la solution obtenue avec le maillage

blockMesh. Par contre, pour les maillages 2 et 3, l'énergie cinétique est surestimée à partir de la moitié de la géométrie. Les valeurs de ζ_1 et ζ_2 pour les trois maillages convergent vers les valeurs calculées avec le maillage blockMesh.

cfMesh Les trois solutions obtenues avec les maillages cfMesh sous-estiment les vitesses U et W , surtout à partir du milieu du diffuseur conique. La solution pour les vitesses U et W obtenue avec le maillage le plus fin s'éloigne de la solution obtenue avec le maillage blockMesh. Cet écart des solutions peut être expliqué par la qualité des couches visqueuses à la paroi. Les solutions pour l'énergie cinétique obtenue avec les trois maillages sous-estiment les valeurs par rapport à la solution obtenue avec le maillage blockMesh. Les valeurs de ζ_1 et ζ_2 pour les trois maillages convergent et oscillent vers les valeurs calculées avec le maillage blockMesh.

5.4 Cas 2

Le tableau 5.3 illustre le coefficient de perte d'énergie pour les différents maillages pour le cas 2.

Tableau 5.3 Quantités d'ingénierie - Cas 2

Cas	Générateur	Type de maillage	Nombre Éléments	ζ_1	ζ_2
Cas2	blockMesh	MMBS	96000	0.253637	0.320922
Cas2	snappyHexMesh	MCCP	60274	0.259632	0.315774
Cas2	snappyHexMesh	MCCP	77746	0.262617	0.311337
Cas2	snappyHexMesh	MCCP	167127	0.272636	0.332437
Cas2	Hexpress	MCCP	95566	0.423853	0.4794114
Cas2	Hexpress	MCCP	190588	0.499834	0.557945
Cas2	Hexpress	MCCP	379365	0.2714945	0.317887
Cas2	cfMesh	MCCP	94661	0.333728	0.394549
Cas2	cfMesh	MCCP	190476	0.333215	0.401733
Cas2	cfMesh	MCCP	388568	0.320021	0.39159

Les six graphiques suivants illustrent les vitesses U , W et l'énergie cinétique k pour les solutions RANS obtenues avec les différents maillages pour le cas 2. Les quantités correspondent au plan XY et à la position $z=405$ mm (voir figure 3.7).

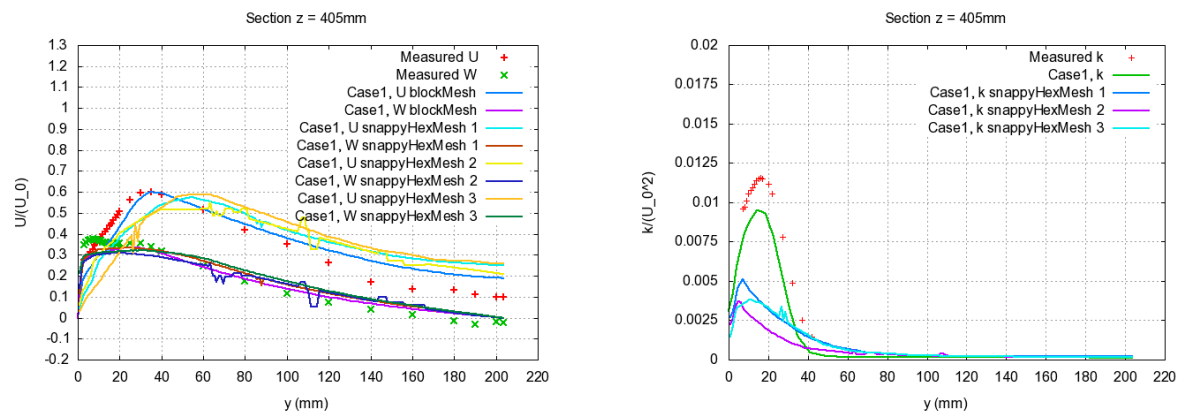


Figure 5.7 Cas 2 Maillage snappyHexMesh Vitesse et Énergie cinétique turbulente

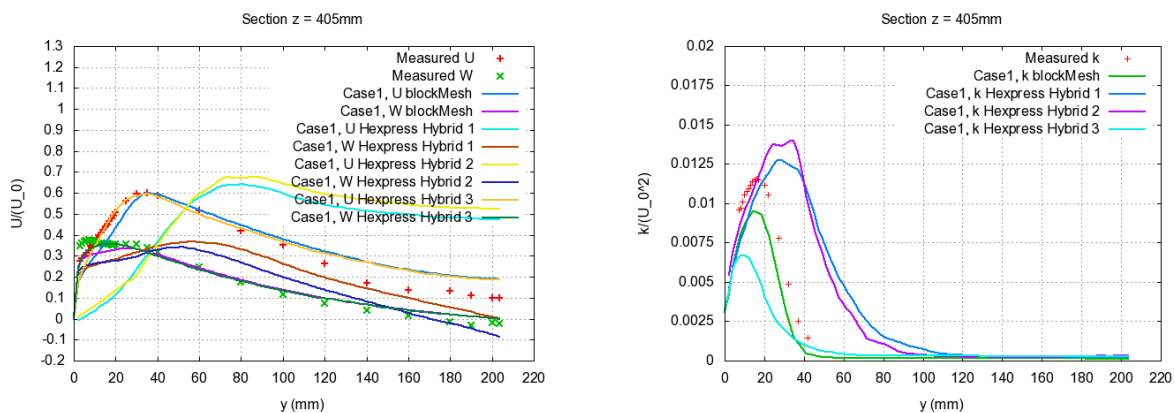


Figure 5.8 Cas 2 Maillage Hexpress Hybrid Vitesse et Énergie cinétique turbulente

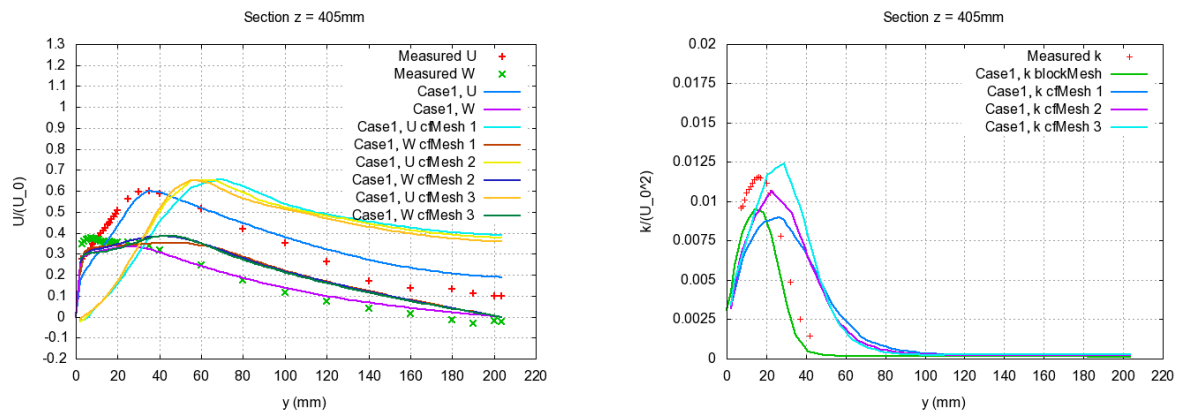


Figure 5.9 Cas 2 Maillage cfMesh Vitesse et Énergie cinétique turbulente

Les courbes suivantes illustrent le coefficient de pression récupérée pariérale pour tous les maillages pour le cas 2.

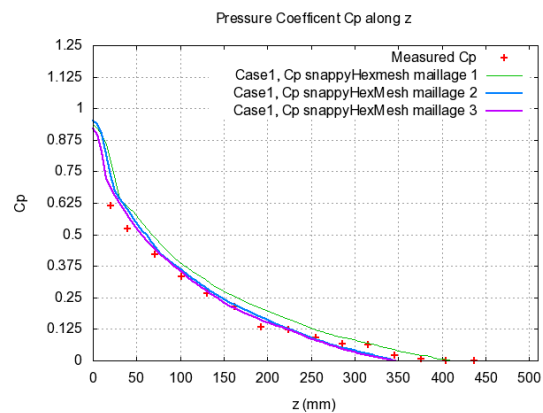


Figure 5.10 Cas 2 Maillages snappyHexMesh C_p

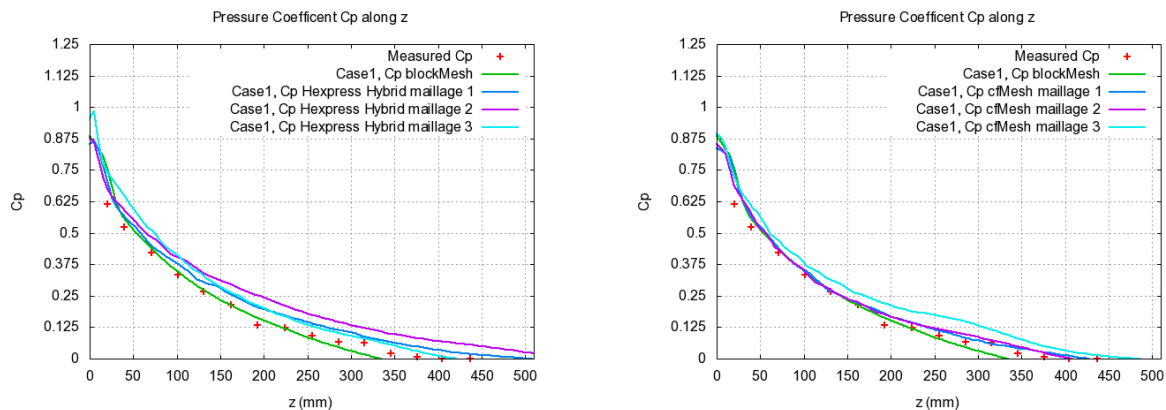


Figure 5.11 Cas 2 Maillages Hexpress Hybrid et cfMesh C_p

5.5 Cas 3

Le tableau 5.4 illustre le coefficient de perte d'énergie pour les différents maillages pour le cas 3.

Tableau 5.4 Quantités d'ingénierie - Cas 3

Cas	Générateur	Type de maillage	Nombre Éléments	ζ_1	ζ_2
Cas3	blockMesh	MMBS	176000	0.24502	0.324016
Cas3	snappyHexMesh	MCCP	74087	0.272117	0.321254
Cas3	snappyHexMesh	MCCP	187504	0.27332	0.313954
Cas3	snappyHexMesh	MCCP	371129	0.303434	0.320343
Cas3	Hexpress	MCCP	184366	0.30246	0.340093
Cas3	Hexpress	MCCP	337918	0.342538	0.349425
Cas3	Hexpress	MCCP	690483	0.316616	0.327817
Cas3	cfMesh	MCCP	172104	0.294151	0.332099
Cas3	cfMesh	MCCP	354628	0.508948	0.559977
Cas3	cfMesh	MCCP	798636	0.288577	0.345197

Les six graphiques suivants illustrent les vitesses U , W et l'énergie cinétique k pour les solutions RANS obtenues avec les différents maillages pour le cas 3. Les quantités correspondent au plan XY et à la position $z=405$ mm (voir figure 3.7).

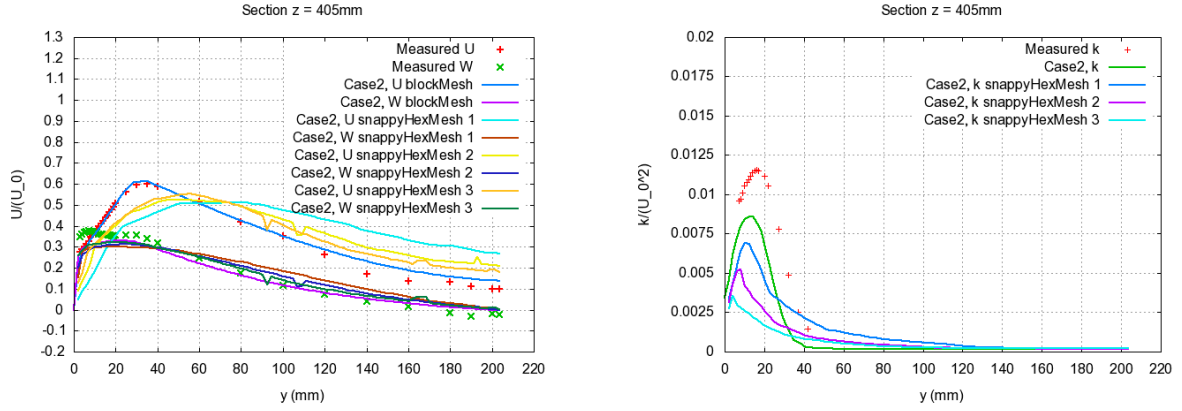


Figure 5.12 Cas 3 Maillage snappyHexMesh Vitesse et Énergie cinétique turbulente

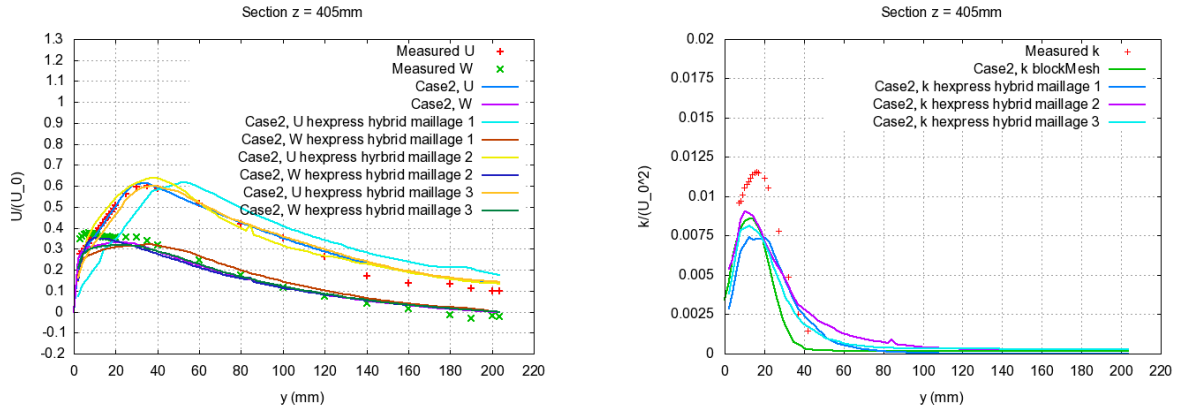


Figure 5.13 Cas 3 Maillage Hexpress Hybrid Vitesse et Énergie cinétique turbulente

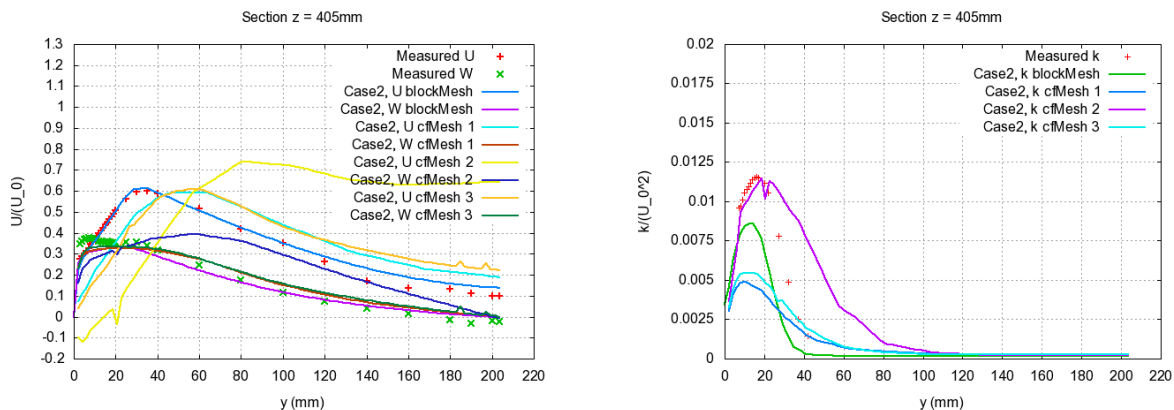


Figure 5.14 Cas 3 Maillage cfMesh Vitesse et Énergie cinétique turbulente

Les courbes suivantes illustrent le coefficient de pression récupérée pariérale pour tous les maillages pour le cas 3.

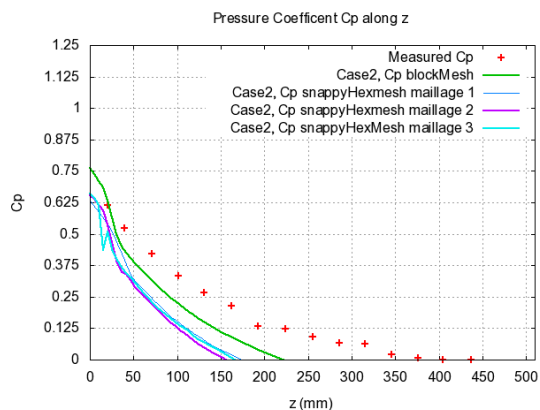


Figure 5.15 Cas 3 Maillages snappyHexMesh C_p

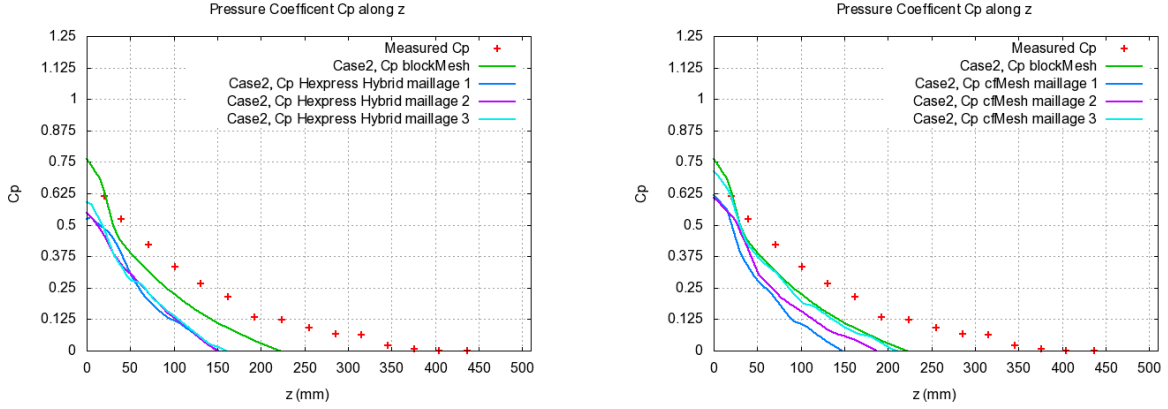


Figure 5.16 Cas 3 Maillages Hexpress Hybrid et cfMesh C_p

5.6 Discussion solutions numériques (Cas 2-3)

snappyHexMesh Les solutions obtenues pour ces deux cas pour les vitesses U et W montrent des oscillations à certains endroits. Ces oscillations sont dues à la qualité des éléments dans le maillage. Les solutions pour l'énergie cinétique pour les deux cas sous-estiment les valeurs comparées avec la solution obtenue avec le maillage blockMesh. Des oscillations sont aussi présentes dans les solutions pour l'énergie cinétique. Les valeurs de ζ_1 et ζ_2 oscillent et s'écartent des valeurs expérimentales et des valeurs de la solution RANS obtenue avec le maillage blockMesh. La récupération de la pression pariétale pour le Cas 2 montre que les solutions sont proches des valeurs expérimentales. Par contre, pour le Cas 3, la courbe de pression pour les trois solutions montre que la condition à la sortie affecte la récupération de pression. Ce manque de récupération de pression est causé par la condition imposée à la sortie, qui est non physique.

Hexpress Hybrid Les solutions obtenues pour les deux cas pour les vitesses U et W convergent en général. Pour l'énergie cinétique, deux solutions du Cas 2 divergent. Le maillage le plus fin converge. Les valeurs de ζ_1 et ζ_2 montrent bien cette tendance. Les courbes de pression pariétale pour le Cas 2 montrent que la pression est récupérée correctement. Pour le Cas 3, la pression pariétale est sous-estimée à cause de la condition imposée à la sortie.

cfMesh Presque toutes les solutions obtenues pour les deux cas pour les vitesses U et W s'écartent des résultats expérimentaux à partir de la mi-section de la géométrie. Sauf la solution pour le maillage 3 du Cas 2 qui converge. Cette divergence des solutions obtenues peut être expliquée par la qualité des couches visqueuses générées aux parois. Les valeurs de

ζ_1 et ζ_2 montrent bien la tendance des solutions numériques. La pression pariétale pour le Cas 2 montre une bonne récupération de la pression aux parois. La pression pariétale pour le Cas 3, qui est sous-estimée, est attribuable à la condition non physique à la sortie.

5.7 Résultats des solutions RANS pour Cas 4

Le tableau 5.5 suivant illustre les différents quantités d'ingénierie pour les différents maillages pour le cas 4.

Tableau 5.5 Quantités d'ingénierie - Cas 4

Cas	Gén	ζ	α_{axIA}	α_{axIII}	α_{sIA}	α_{sIII}	β_{axIA}	β_{axIII}	S_{IA}
Cas4	Exp.	-	1.03	1.09	0.06	0.04	1.02	1.02	0.31
Cas4	ICEM	0.2923	1.0486	1.35281	0.0593	0.0572	1.143	1.215	0.248
Cas4	Hex	0.1967	1.04734	1.30197	0.0594	0.0346	1.1437	1.1523	0.249
Cas4	Hex	0.1877	1.04869	1.30738	0.0596	0.0379	1.1454	1.1599	0.249
Cas4	Hex	0.1969	1.0492	1.3406	0.0593	0.0425	1.1462	1.1793	0.248
Cas4	cfMesh	0.1623	1.04938	1.34794	0.0591	0.0432	1.1366	1.1803	0.248
Cas4	cfMesh	0.1736	1.04989	1.3611	0.0598	0.0464	1.1449	1.1900	0.244
Cas4	cfMesh	0.1701	1.04994	1.361	0.0597	0.0515	1.1450	1.2039	0.248

Les courbes suivantes illustrent le coefficient de pression récupérée pariérale pour tous les maillages Hexpress Hybrid et cfMesh pour le cas 4.

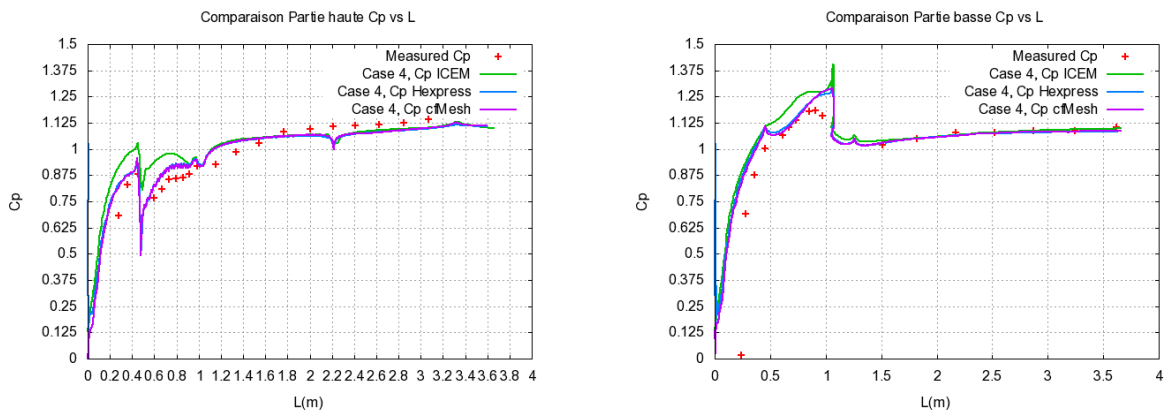
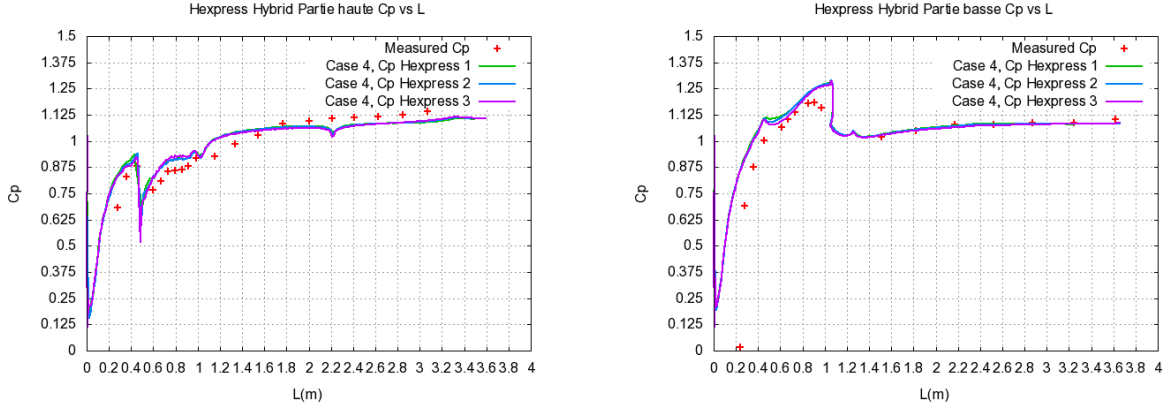
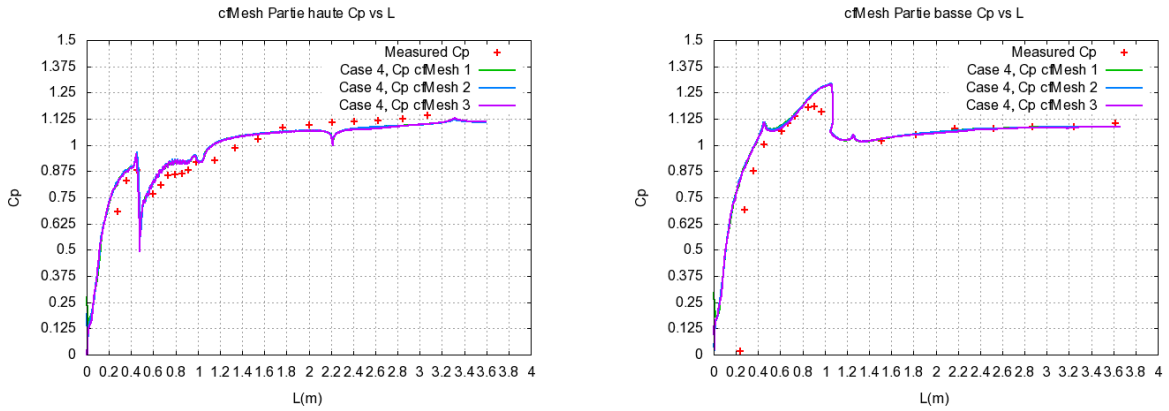


Figure 5.17 Cas 4 Maillage 3 Hexpress Hybrid et cfMesh C_p

Figure 5.18 Cas 4 Maillages Hexpress Hybrid C_p Figure 5.19 Cas 4 Maillages cfMesh C_p

5.7.1 Discussion solutions numériques Cas 4

Hexpress Hybrid Les solutions obtenues avec les trois maillages pour les pressions pariétales suivent la tendance des valeurs expérimentales et de la solution obtenue avec le maillage ICEM. La pression pariétale pour la partie haute du diffuseur hydraulique calculée avec les maillages montre que la perte de pression est surestimée dans la partie haute du coude. La pression pariétale pour la partie basse du diffuseur hydraulique est sous-estimée autour du coude du diffuseur. Les différentes quantités d'ingénierie calculées sont proches des valeurs expérimentales, sauf pour le coefficient de perte ζ . Les pertes sont surestimées par rapport à la valeur obtenue avec le maillage ICEM. Les différences peuvent être expliquées par le modèle de turbulence utilisé et la qualité et quantité des couches visqueuses à la paroi. La condition initiale à la sortie du diffuseur hydraulique pour la pression a été changée en imposant une moyenne de pression de zéro au lieu d'imposer une pression de zéro à la sortie.

cfMesh Les solutions obtenues avec les trois maillages pour les pressions pariétales suivent la tendance des valeurs expérimentales et de la solution obtenue avec le maillage ICEM et ceux des solutions des maillages Hexpress Hybrid. Les trois solutions sont très similaires entrent elles. Pour les quantités d'ingénierie calculées pour les trois maillages, le coefficient de perte ζ représente la quantité avec le plus grand écart. Les différences peuvent être expliquées par le modèle de turbulence utilisé et la qualité et quantité des couches visqueuses à la paroi. La condition initiale à la sortie du diffuseur hydraulique pour la pression a été changée en imposant une moyenne de pression de zéro au lieu d'imposer une pression de zéro à la sortie.

CHAPITRE 6 CONCLUSION

La contribution principale des travaux effectués pour ce mémoire consistait à comparer trois générateurs de maillages pour des écoulements turbulents visqueux dans des composantes de turbines. La majeure partie de l'effort des travaux a été concentrée sur la génération des maillages et l'analyse des solutions obtenues avec lesdits maillages. Nous allons faire un résumé des travaux effectués, leurs limitations et les améliorations futures possibles.

6.1 Synthèse des travaux

La première partie de nos travaux a été de faire une revue de l'art des méthodes de génération de maillage. Nous avons présenté divers algorithmes de génération de maillage, dont ceux capables de générer automatiquement des maillages hexaédriques. Les divers problèmes rencontrés par les algorithmes durant la génération de maillage ont été soulevés tel la capture des caractéristiques des géométries complexes et la qualité des couches visqueuses générées. Une méthodologie a été élaborée en choisissant quatre cas qui ont des données expérimentales et solutions numériques déjà disponibles. La méthodologie consistait à comparer les solutions RANS obtenues avec des MCCP avec les solutions RANS obtenues avec des MMBS. Un aspect important de cette méthodologie a été le choix de tester les quatre cas avec trois générateurs de maillage différents. Chaque générateur a une implémentation différente d'algorithmes pour générer des maillages composés principalement d'éléments hexaédriques.

Le générateur de maillage snappyHexMesh est un produit capable de générer des maillages de qualité moyenne pour des géométries simples. Par contre, pour des maillages d'écoulements internes dans des géométries complexes, deux problèmes principaux sont apparus. Le premier problème a été la capture des caractéristiques de la géométrie du Cas 4. Les courbes de la partie haute de la surface de transition entre le diffuseur conique et l'expansion du diffuseur hydraulique ne furent pas capturées correctement. Cela eut comme effet d'arrondir l'intersection des deux surfaces. L'autre problème encouru fut au niveau de la génération des couches visqueuses. Les couches visqueuses étaient non complètes aux intersections de certains coins et composées d'éléments de mauvaise qualité.

Le générateur de maillage Hexpress Hybrid génère des maillages de bonne qualité pour des écoulements internes dans des géométries complexes tel le Cas 4. Par contre, deux problèmes sont ressortis suite aux présents travaux. Le premier problème est que parfois, le maillage ne respecte pas les frontières de la géométrie. L'algorithme va toujours insérer au moins une

couche visqueuse, même si les frontières de la géométrie ne sont pas respectées. Ce problème fut observé dans la Cas 2, proche de l'intersection de l'extension à l'entrée et du diffuseur conique. L'autre problème est le découplage des couches visqueuses. Par défaut, les couches visqueuses ne sont pas séparées par surface. Pour découpler correctement les couches visqueuses et respecter les frontières de la géométrie, une attention particulière doit être prêtée au nombre de couches visqueuses insérées dans la géométrie.

Le plus gros problème rencontré avec le générateur de maillage cfMesh, a été le contrôle local des couches visqueuses. Pour certains des cas, notamment les Cas 2 et 3, les couches visqueuses ont des formes légèrement ondulantes, surtout sur les arêtes des couches visqueuses qui sont parallèles à la surface du diffuseur conique. Les couches peuvent être optimisées et enlever lesdites ondulations des arêtes en utilisant une option disponible d'optimisation des couches visqueuses. Par contre, cela introduit des éléments de mauvaise qualité aux intersections des surfaces, qui rendent le calcul d'une solution impossible.

Les solutions RANS pour les quatre cas ont démontré une grande sensibilité à la qualité des couches visqueuses. Pour les trois premiers cas, cela pouvait être vu dans les graphiques des vitesses U et W et d'énergie cinétique k . Le calcul des pertes pour le Cas 4 démontre cette dépendance à la qualité des couches visqueuses. Nous pouvons souligner que le Cas 3 comporte une condition de sortie non physique. Pour cette raison, la pression pariétale n'est pas calculée correctement.

D'un point de vue global, nos travaux nous ont permis mettre en place et de tester une méthodologie pour évaluer trois générateurs de maillage automatique composées principalement d'éléments hexaédriques dans des composantes des turbines hydrauliques.

6.2 Limitations de la solution proposée

Le travail est limité par plusieurs facteurs, tel le nombre des cas testés, le choix du modèle de turbulence $k-\epsilon$ et les types d'écoulement étudié.

Le travail a été fait avec quatre cas, parmi lesquels trois cas sont des géométries simples composées de cylindres et de cônes. Le Cas 4 est le seul cas qui est une géométrie plus complexe. Les écoulements turbulents pour les trois premiers cas sont symétriques. Le dernier cas est un écoulement plus réaliste, composé d'un écoulement principal et d'écoulements secondaires.

Le choix du modèle de turbulence $k-\epsilon$ influence directement l'épaisseur des couches visqueuses que l'on peut générer pour les maillages. Le modèle $k-\epsilon$ utilise une loi de paroi qui modélise la couche limite près de la paroi, et pour laquelle le premier point du maillage doit se situer dans la zone logarithmique de la couche limite. L'utilisation des autres modèles de turbulence

nous permettrait de mieux résoudre les couches visqueuses au prix de maillages beaucoup plus fins près des parois.

Tous les cas tests sont des écoulements internes qui sont plus difficiles à mailler avec les algorithmes de génération de maillage qui ont été implémentés dans snappyHexMesh, Hexpress Hybrid et cfMesh. Si toutes les caractéristiques des géométries complexes ne sont pas capturées correctement, les solutions RANS s'écartent des données expérimentales.

6.3 Améliorations futures

Les améliorations futures pour ce projet peuvent venir de deux façons, en considérant des géométries plus complexes telles des roues de turbines et en améliorant les algorithmes du générateur de maillage cfMesh. La raison du choix de cfMesh est basée sur les arguments suivants. Le code source de cfMesh est disponible gratuitement, car c'est un logiciel avec une licence ouverte et la compagnie qui a conçu cfMesh cherche des collaborations avec les universités et les centres de recherches. Une autre raison est que le générateur évolue dans le même environnement informatique que celui du solveur *openFOAM*. Cela va permettre de garder sensiblement la même méthodologie.

Les deux autres générateurs n'ont pas été choisis pour diverses raisons. Dans le cas de SnappyHexMesh, le générateur est trop difficile à calibrer correctement pour une géométrie complexe et génère des maillages avec des couches visqueuses de mauvaise qualité. Pour Hexpress Hybrid, le code source n'est pas disponible et la compagnie a déjà des partenariats avec des universités. Il peut être utilisé comme mailleur de comparaison.

Des améliorations devront être effectuées au niveau de l'algorithme de cfMesh qui contrôle les couches visqueuses. La partie de l'algorithme dans cfMesh qui optimise les couches devra être amélioré ou calibré pour des géométries complexes. Notre méthodologie pourra être modifiée pour prendre en compte cette nouvelle stratégie.

RÉFÉRENCES

- ALFONSI, G. (2009). Reynolds-averaged navier–stokes equations for turbulence modeling. *Applied Mechanics Reviews*, 62(4) :040802.
- ANDERSSON, U. AND DAHLBÄCK, N. (1998). Experimental evaluation of draft tube flow—a test case for cfd simulations. In *XIX IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Singapore*.
- ANDERSSON, U. AND KARLSSON, R. (1999). Quality aspects of the turbine 99 draft tube experiment. In *Proceedings from Turbine 99-workshop on draft tube flow*.
- ANSAR, M. (2016). Benchmarking openfoam solver for cfd applications. <http://www.pricoltech.com/benchmarking-openfoam-solver-for-cfd-applications/>. [On-line; accessed 11-May-2016].
- ATTA, E. (1981). Component-adaptive grid interfacing. In *AIAA 19th Aerospace Sciences Meeting*.
- BAEHMMAN, P., WITTCHEN, S., SHEPARD, M., GRICE, K., AND YERRY, M. (1987). Robust, geometrically based, automatic two-dimensional mesh generation. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 24(6) :1043–1078.
- BAYRAKTAR, E., MIERKA, O., AND TUREK, S. (2012). Benchmark computations of 3d laminar flow around a cylinder with cfx, openfoam and featflow. *International Journal of Computational Science and Engineering*, 7(3) :253–266.
- BENEK, J., BUNING, P., AND STEGER, J. (1985). 3-d chimera grid embedding technique. In *AIAA seventh CFD conference*, Cincinnati, OH,USA.
- BENEK, J., STEGER, J., AND DOUGHERTY, F. (1987). Extended chimera grid embedding scheme with application to viscous flows. In *AIAA eighth CFD conference*, Honolulu, HI,USA.
- BENEK, J., STEGER, J., AND FC, F. D. (1983). A flexible grid embedding technique with application to the euler equations. In *AIAA sixth CFD conference*, Danvers, MA,USA.
- BERHANU MULU, G. AND M., C. (2007). Effects of inlet boundary conditions on spiral casing simulation. In *2nd IAHR International Meeting of the Workgroup on Cavitation and Dynamic Problems in Hydraulic Machinery and Systems Timisoara, Romania October*, pages 24–26.
- BERN, M. AND PLASSMAN, P. (1999). Mesh generation. In Sack, J.R.and Urrutia, J., editor, *Handbook of Computational Geometry*, volume 7214, pages 291–332. Springer Berlin Heidelberg.

- BOTHE, F., FRIEBE, C., HEINRICH, M., AND SCHWARZE, R. (2014). Cfd simulation of incompressible turbomachinery—a comparison of results from ansys fluent and open-foam. In *ASME Turbo Expo 2014 : Turbine Technical Conference and Exposition*, pages V02BT39A025–V02BT39A025. American Society of Mechanical Engineers.
- BOTTARO, A., DROTZ, A., GAMBA, P., SOTTAS, G., AND NEURY, C. (1993). Euler simulations of flow in a francis distributor and runner. In Sottas, G. and Ryhming, I., editors, *3D-Computation of Incompressible Internal Flows*, volume 39 of *Notes on Numerical Fluid Mechanics (NNFM)*, pages 77–84. Vieweg+Teubner Verlag.
- BOUNOUS, O. (2008). Studies of the ercoftac conical diffuser with openfoam. *Department of Applied Mechanics Chalmers University of technology, Göteborg, Sweden*.
- CAMARERO, R. (2009). *Génération de Maillage :Une introduction pratique*. Ecole Polytechnique de Montreal, 2900 Boulevard Edouard-Montpetit, Québec, H3T 1J4.
- CLAUSEN, P., KOH, S., AND WOOD, D. (1993). Measurements of a swirling turbulent boundary layer developing in a conical diffuser. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 6(1) :39 – 48.
- COMPANY, T. D. S. (1988). *Stereolithography Interface Specification*. 3D Systems,Inc, Valencia,CA, USA,.
- CREATIVES FIELDS, L. (2015). cfMesh. <http://www.c-fields.com/>. [Online; accessed 16-September-2015].
- DRTINA, P., GOEDE, E., AND SCHACHENMANN, A. (1992). Three-dimensional turbulent flow simulation for two different hydraulic turbine draft tubes. In *Proc. of the First European CFD conference*, pages 7–11.
- ENGSTRÖM, T., GUSTAVSSON, L., AND KARLSSON, R. (June 18-20, 2001). Proceeding of turbine-99-workshop 2. In *The second ERCOFTAC Workshop on Draft Tube Flow*, Älvkarleby, Sweden.
- ENGWIRDA, D. AND IVERS, D. (2014). Face-centred voronoi refinement for surface mesh generation. *Procedia Engineering*, 82 :8 – 20. 23rd International Meshing Roundtable (IMR23).
- FERZIGER, J. H. AND PERIC, M. (2012). *Computational methods for fluid dynamics*. Springer Science & Business Media.
- FORMAGGIA, L. AND PEROTTO, S. (2003). Anisotropic error estimates for elliptic problems. *Numerische Mathematik*, 94(1) :67–92.
- FREDERICK, C. O., WONG, Y. C., AND EDGE, F. (1970). Two-dimensional automatic mesh generation for structural analysis. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2(1) :133–144.

- FREY, P. AND GEORGE, P.-L. (2000). *Mesh Generation Application to finite Elements*. John Wiley and Sons.
- FUJIMOTO, K. AND WANG, Z. (2008). Body-fitted cartesian grid method for complex high reynolds number flows. In *5th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*, pages 144 – 148, Venice, Italy.
- FUKUSHIMA, Y., SASAKI, D., AND NAKAHASHI, K. (2015). Cartesian mesh linearized euler equations solver for aeroacoustic problems around full aircraft. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2015.
- GAO, X., HUANG, J., LI, S., DENG, Z., AND CHEN, G. (2014). An evaluation of the quality of hexahedral meshes via modal analysis. In *1st Workshop on Structured Meshing : Theory, Applications, and Evaluation*.
- GOMEZ, S., GRAVES, B., AND POROSEVA, S. (2014). On the accuracy of rans simulations of 2d boundary layers with openfoam. *AIAA*, 2087 :16–20.
- ITO, Y., SHIH, A., AND SONI, B. (2008). Octree-based reasonable-quality hexahedral mesh generation using a new set of refinement templates. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 77(13) :1809–1833.
- JASAK, H. (1996). *Error Analysis and Estimation for the Finite Volume Method with Application to Fluid Flows*. PhD thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine.
- KECK, H. AND SICK, M. (2008). Thirty years of numerical flow simulation in hydraulic turbomachines. *Acta Mechanica*, 201(1-4) :211–229.
- KNUPP, P. (2007). Remarks on mesh quality. In *45th AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibit - Conference Proceedings*, pages 144–148, Reno, NV.
- LAUNDER, B. AND SPALDING, D. (1974). The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3(2) :269 – 289.
- LÖHNER, R. (2014). Recent advances in parallel advancing front grid generation. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 21(2) :127–140.
- MARÉCHAL, L. (2001). A new approach to octree-based hexadral meshing. In *IN PROCEEDINGS OF THE 10H INTERNATIONAL MESHING ROUNDTABLE*, Newport Beach, CA, USA.
- MARÉCHAL, L. (2009). Advances in octree-based all-hexahedral mesh generation : handling sharp features. In *IN PROCEEDINGS OF THE 18TH INTERNATIONAL MESHING ROUNDTABLE*, Salt Lake City, UT, USA.
- NILSSON, H. AND PAGE, M. (December 7-9, 2005). Proceeding of turbine-99 - workshop iii. In *OpenFOAM simulation of the flow in the Holleforsen draft tube model*, Porjus, Sweden.

- NILSSON, H., PAGE, M., BEAUDOIN, M., GSCHAUER, B., AND JASAK, H. (2009). The openfoam turbomachinery working group, and conclusions from the turbomachinery session of the third openfoam workshop. In *24th IAHR Symposium Hydraulic Machinery and Systems*, Foz Do Iguasu, Brazil.
- NUMECA (2014). HEXPRESS. <http://www.numeca.be/index.php?id=29>. [Online; accessed 19-July-2014].
- OPENFOAM (2014). SnappyHexMesh. <http://www.openfoam.org/user/snappyHexMesh.php>. [Online; accessed 19-July-2014].
- P. TERNIK, P. AND RUDOLF, R. (2014). Laminar forced convection heat transfer characteristics from a heated cylinder in water based nanofluids. *International Journal of Simulation Modelling*, 13(3) :312–322.
- PAGE, M., BEAUDOIN, M., AND GIROUX, A. (2010). Steady-state capabilities for hydroturbines with openfoam. In *IOP Conference Series : Earth and Environmental Science*, volume 12, page 012076. IOP Publishing.
- PERALTA, C., NUGUSSE, H., KOKILAVANI, S., SCHMIDT, J., AND STOEVE SANDT, B. (2014). Validation of the simplefoam (rans) solver for the atmospheric boundary layer in complex terrain. In *ITM Web of Conferences*, volume 2, page 01002. EDP Sciences.
- PRICE, M. AND ARMSTRONG, C. (1997). Hexahedral mesh generation by medial surface subdivision : Part ii. solids with flat and concave edges. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 40(1) :111–136.
- RAI, M. AND MOIN, P. (1991). Direct simulations of turbulent flow using finite-difference schemes. *Journal of Computational Physics*, 96(1) :15 – 53.
- RECKTENWALD, G. (2010). *The SIMPLE Algorithm for Pressure-Velocity Coupling*. Portland State University.
- ROACHE, P. (2002). Code verification by the method of manufactured solutions. *Journal of Fluids Engineering*, 124(1) :4–10.
- RODI, W., BONNIN, J., AND BUCHAL, T. (1995). Ercoftac workshop on data bases and testing of calculation methods for turbulent flows. Technical report, University of Karlsruhe.
- SANDIA, N. L. (2007). *The Verdict Geometric Quality Library*. Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, USA, 87185.
- SCHNEIDERS, R. (1996). A grid-based algorithm for the generation of hexahedral element meshes. *Engineering with computers*, 12(3-4) :168–177.
- SCHNEIDERS, R., SCHINDEL, R., AND WEILLER, F. (1996). Octree-based generation of hexahedral element meshes. In *IN PROCEEDINGS OF THE 5TH INTERNATIONAL MESHING ROUNDTABLE*, Pittsburgh, PA, USA.

- SONI, B. (2000). Grid generation :past,present, and future. *Applied Numerical Mathematics*, 32(4) :361–369.
- THOMPSON, J. (1982). Elliptic grid generation. *Applied Mathematics and Computation*, 10–11 :79–105.
- THOMPSON, J., SONI, B., AND WEATHERILL, N. (1999). *Grid generation*. CRC Press LLC.
- THOMPSON, J., WARZI, Z., AND MASTIN, C. (1985). *Numerical grids generation, foundations and applications*. North Holland.
- VU, T., DEVALS, C., ZHANG, Y., NENNEMANN, B., AND GUIBAULT, F. (2010). Steady and unsteady flow computation in an elbow draft tube with experimental validation. *IOP Conference Series : Earth and Environmental Science*, 12(1) :012045.
- WEI, D., SPENCE, S. M., KAREEM, A., AND JEMCOV, A. (2014). A structured mesh boundary motion approach for simulating wind effects on bluff bodies with changing boundaries. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 126 :118 – 131.
- WITTEK, A., GROS LAND, N. M., JOLDES, G. R., MAGNOTTA, V., AND MILLER, K. (2016). From finite element meshes to clouds of points : A review of methods for generation of computational biomechanics models for patient-specific applications. *Annals of biomedical engineering*, 44(1) :3–15.

ANNEXE A RÉSULTATS PARAMÉTRÉS DE QUALITÉ

Cas 1

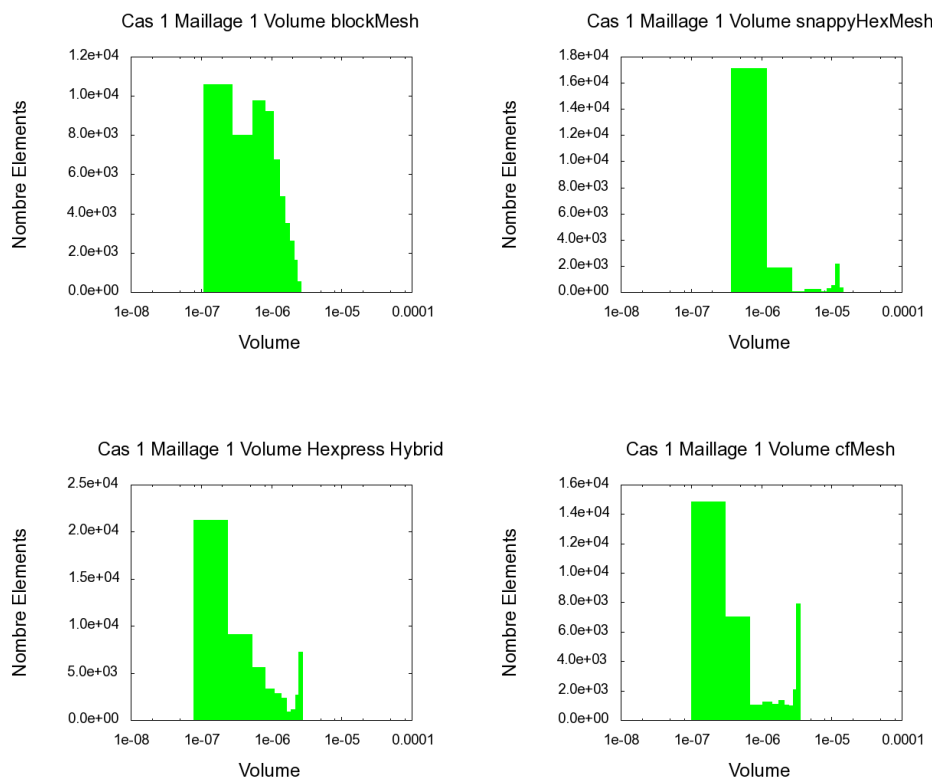


Figure A.1 Distribution Volume Cas 1

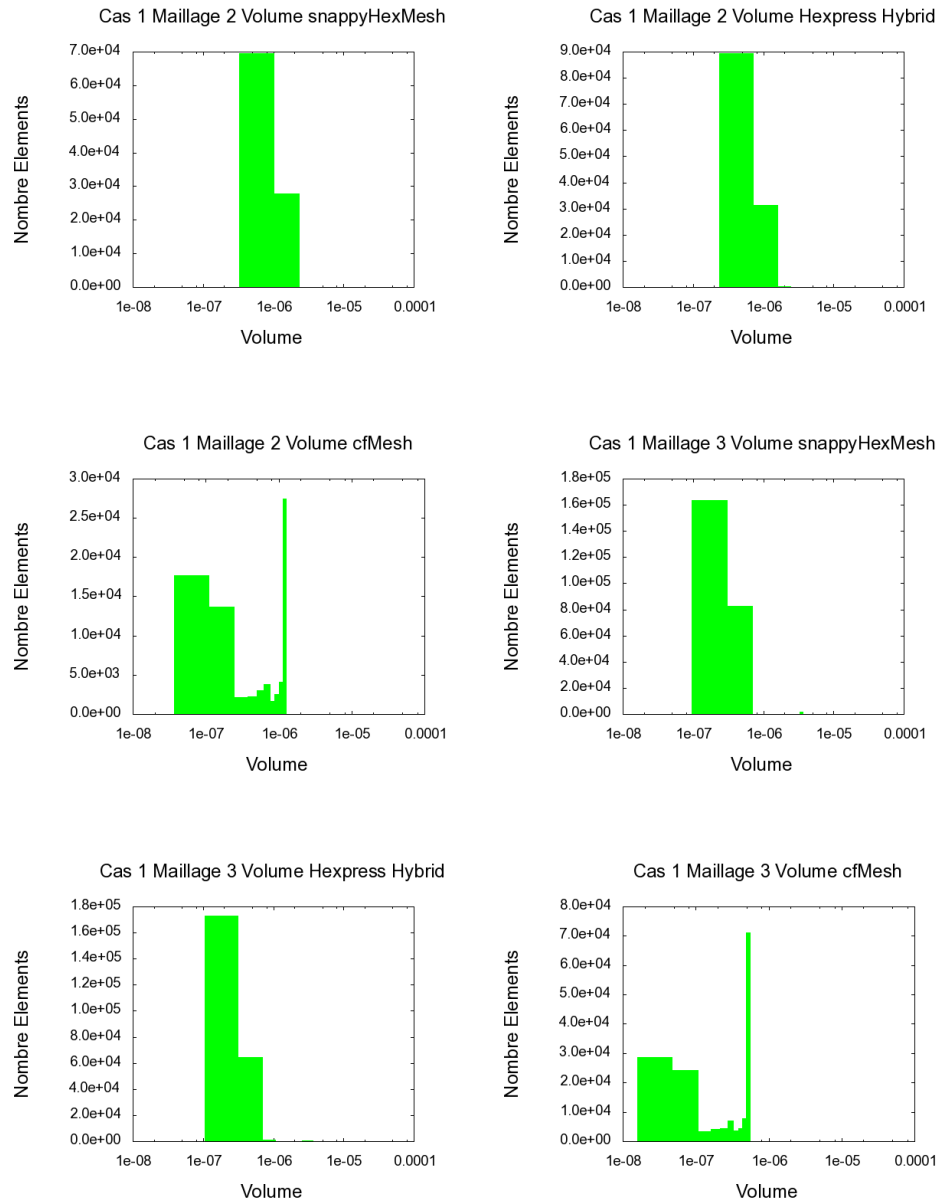


Figure A.2 Distribution Volume Cas 1

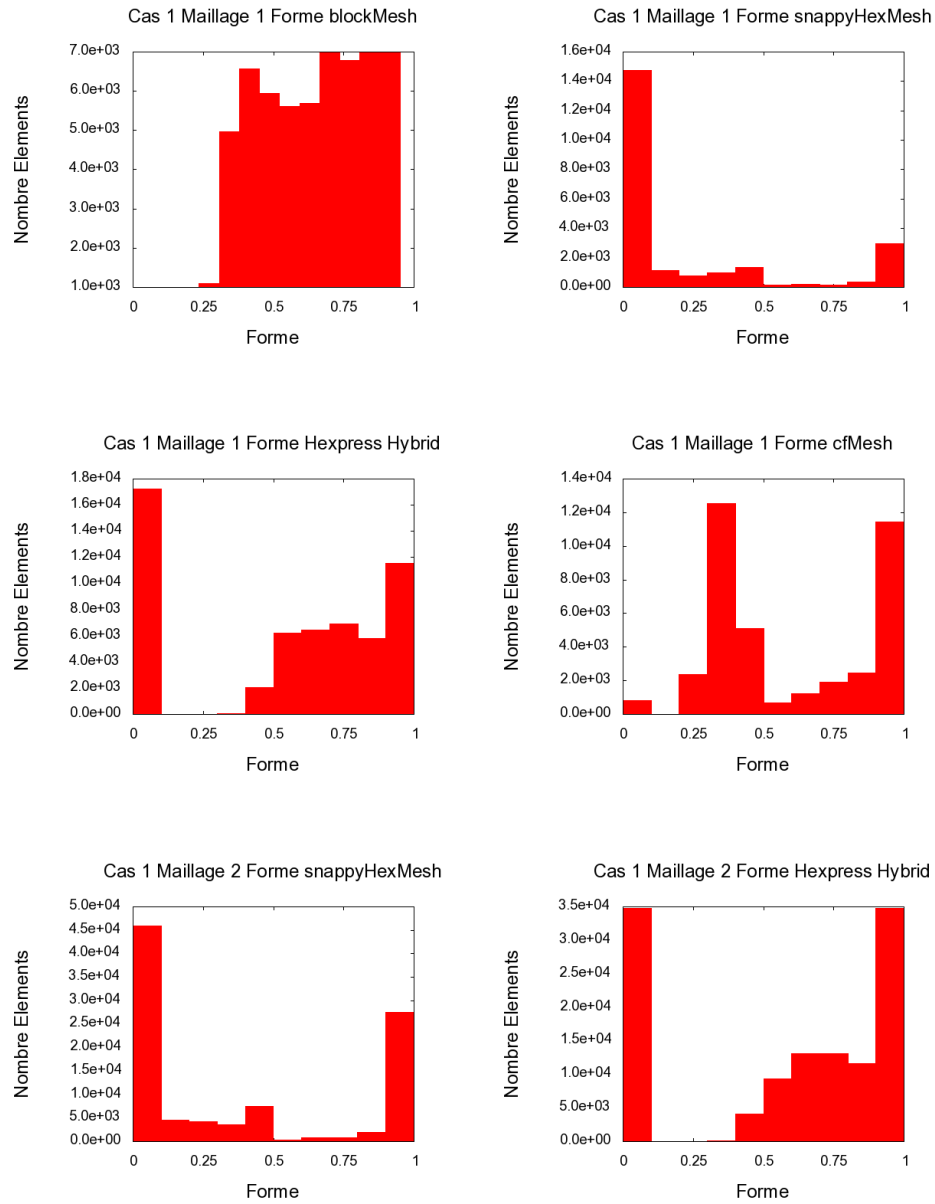


Figure A.3 Distribution Forme Cas 1

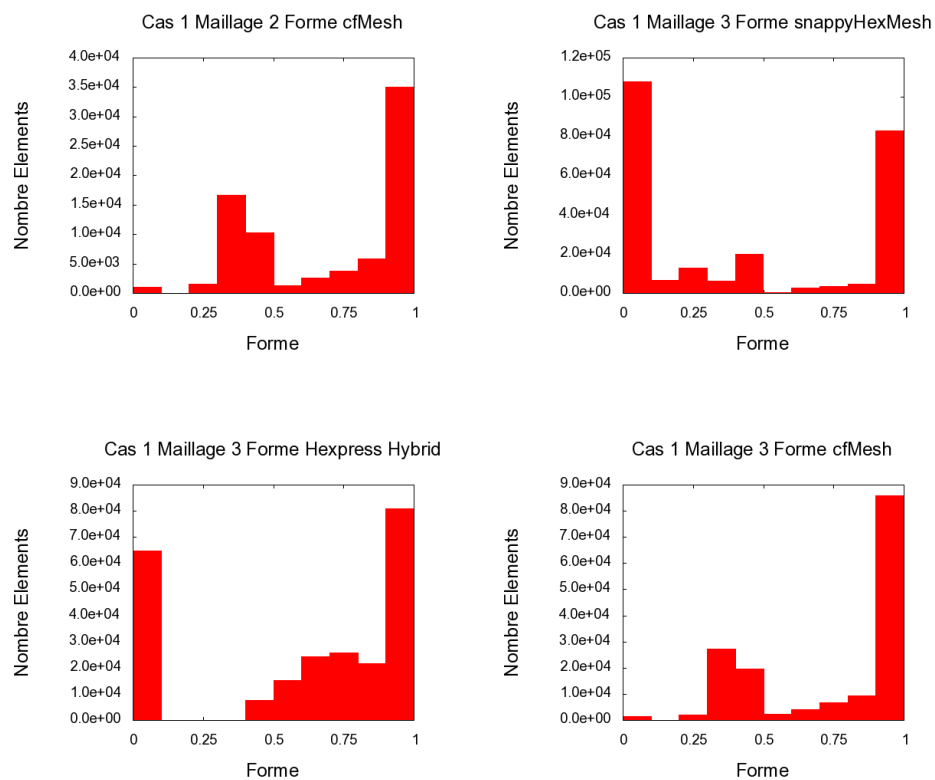


Figure A.4 Distribution Forme Cas 1

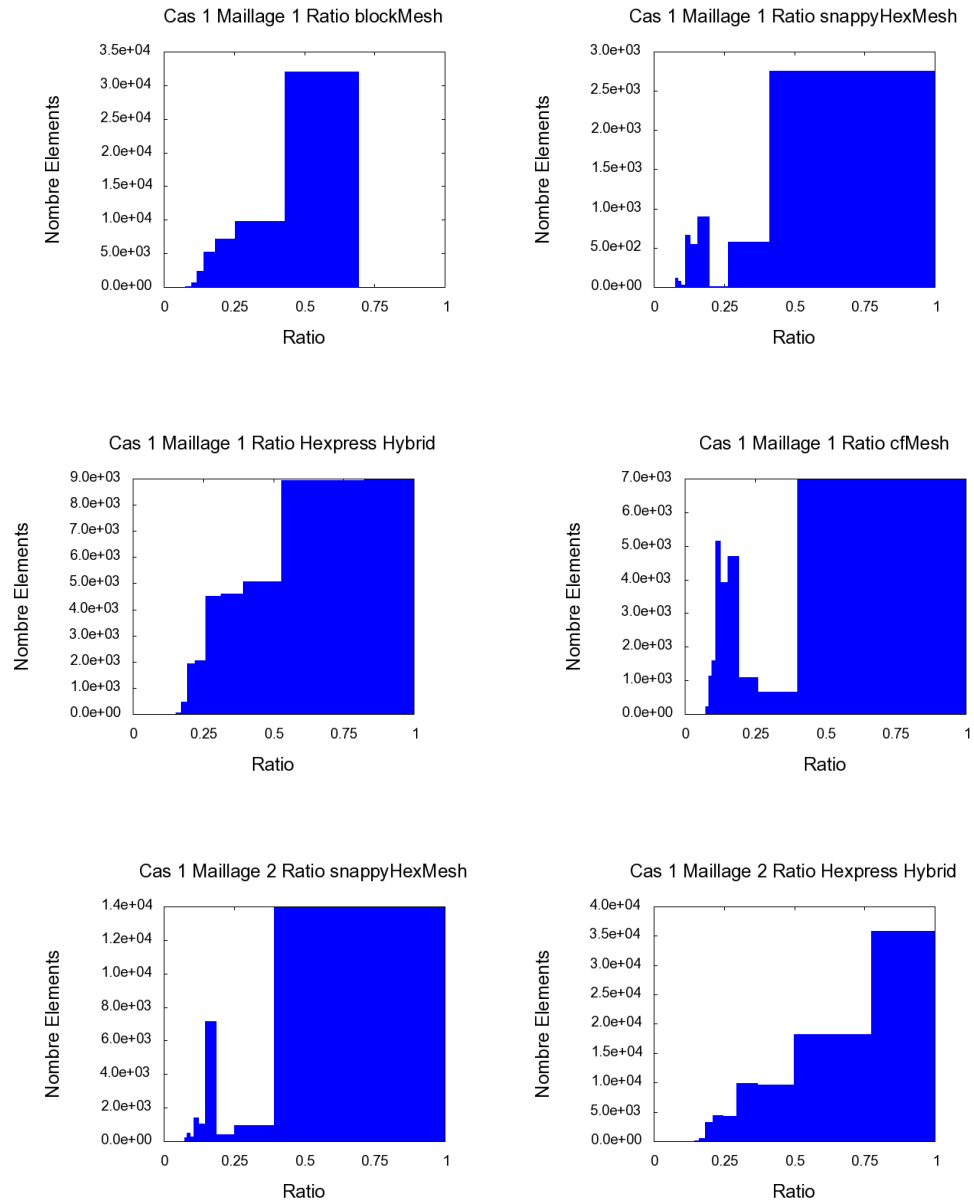


Figure A.5 Distribution Ratio Cas 1

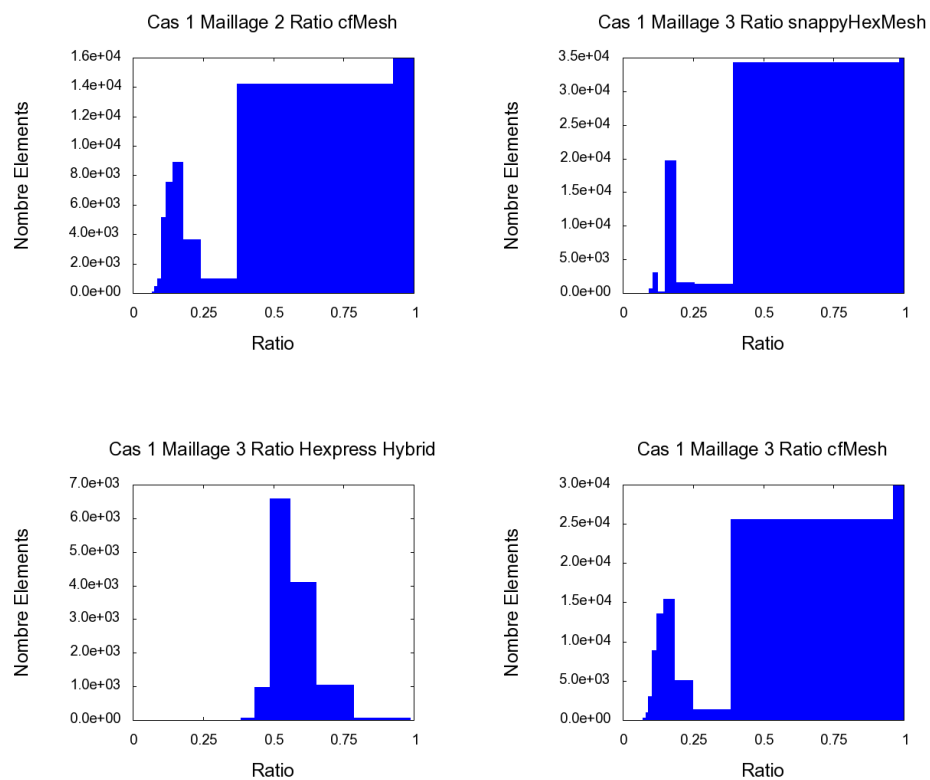


Figure A.6 Distribution Ratio Cas 1

Cas 2

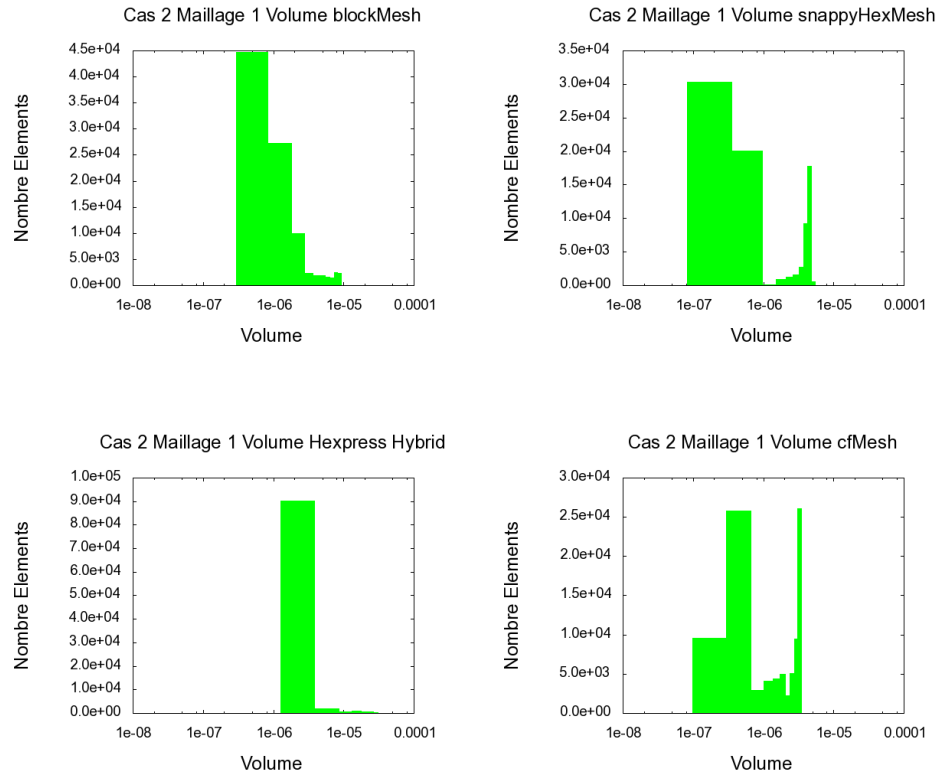


Figure A.7 Distribution Volume Cas 2

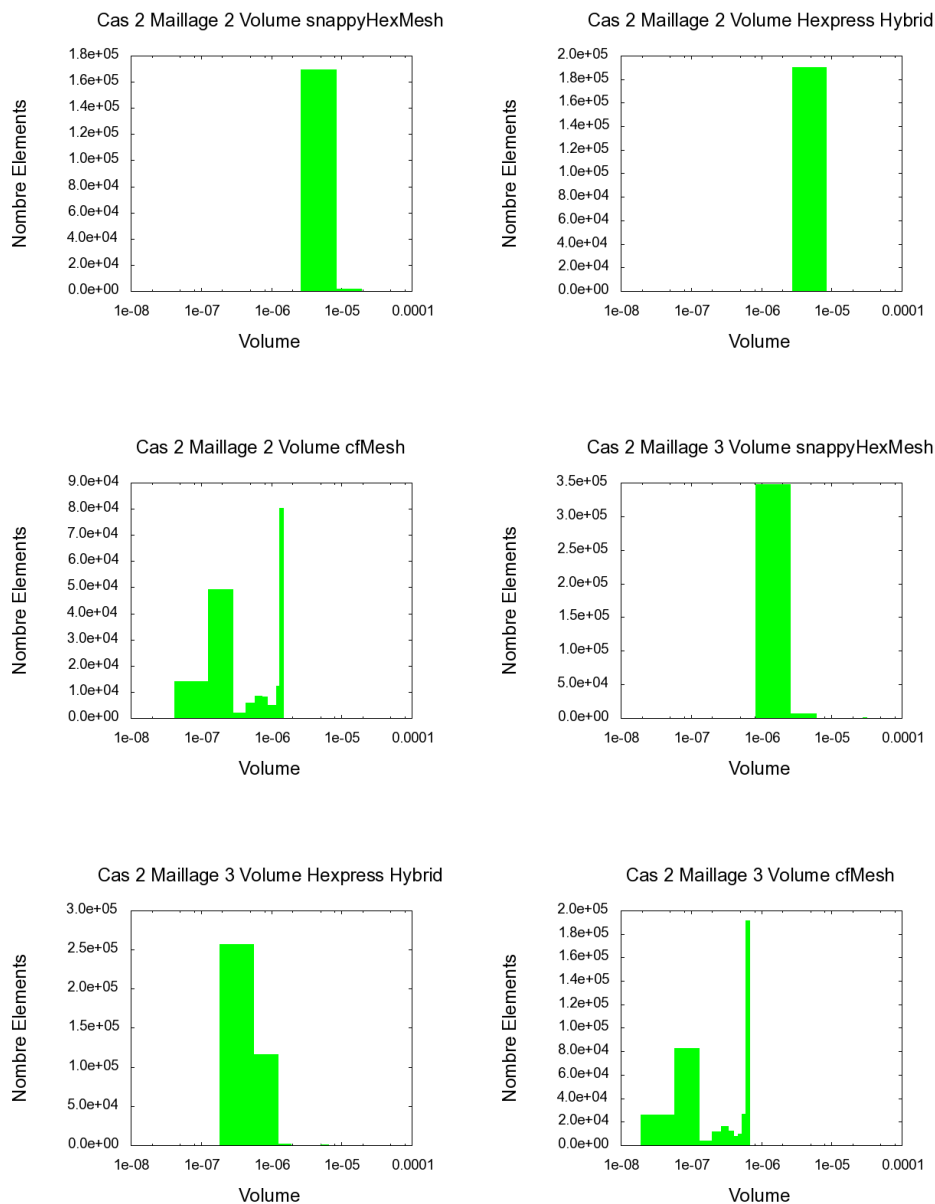


Figure A.8 Distribution Volume Cas 2

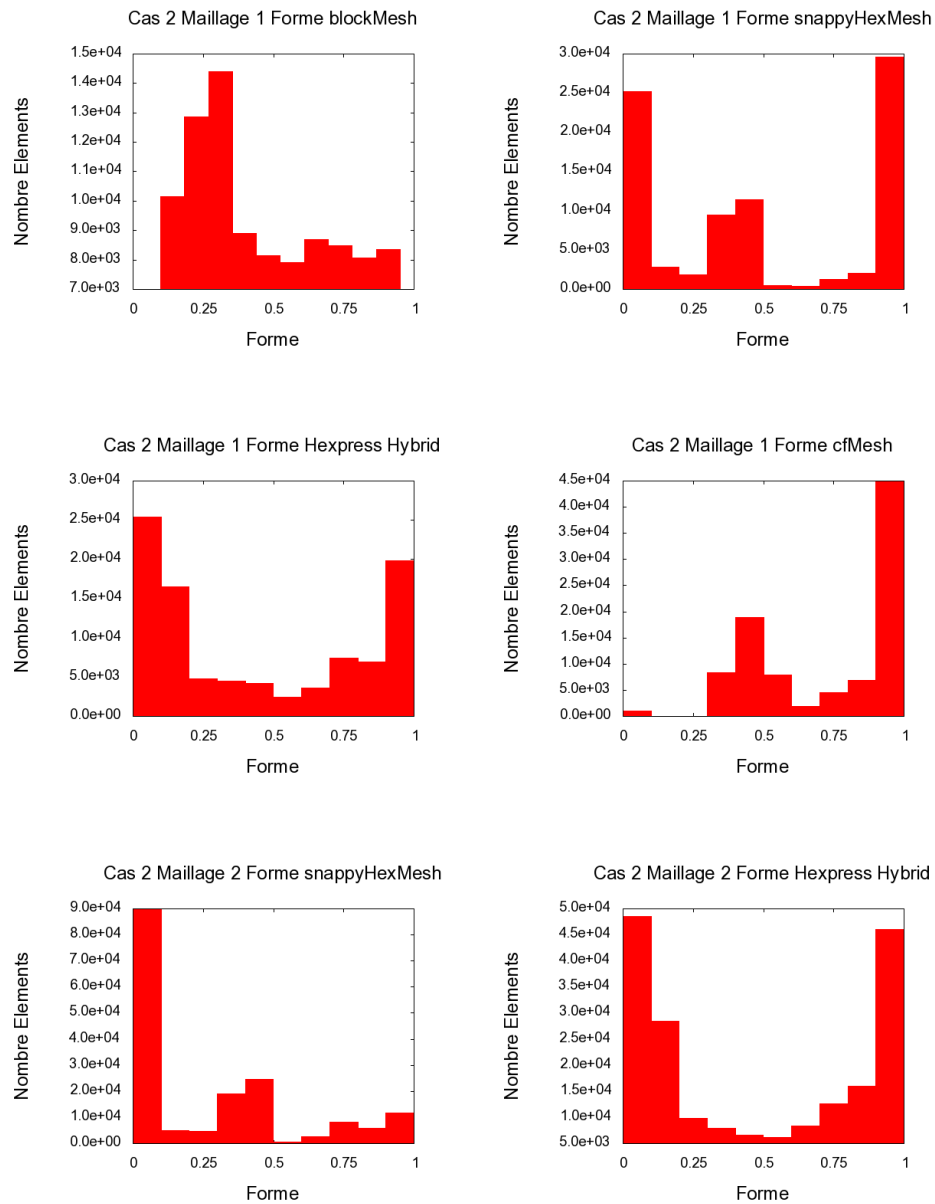


Figure A.9 Distribution Forme Cas 2

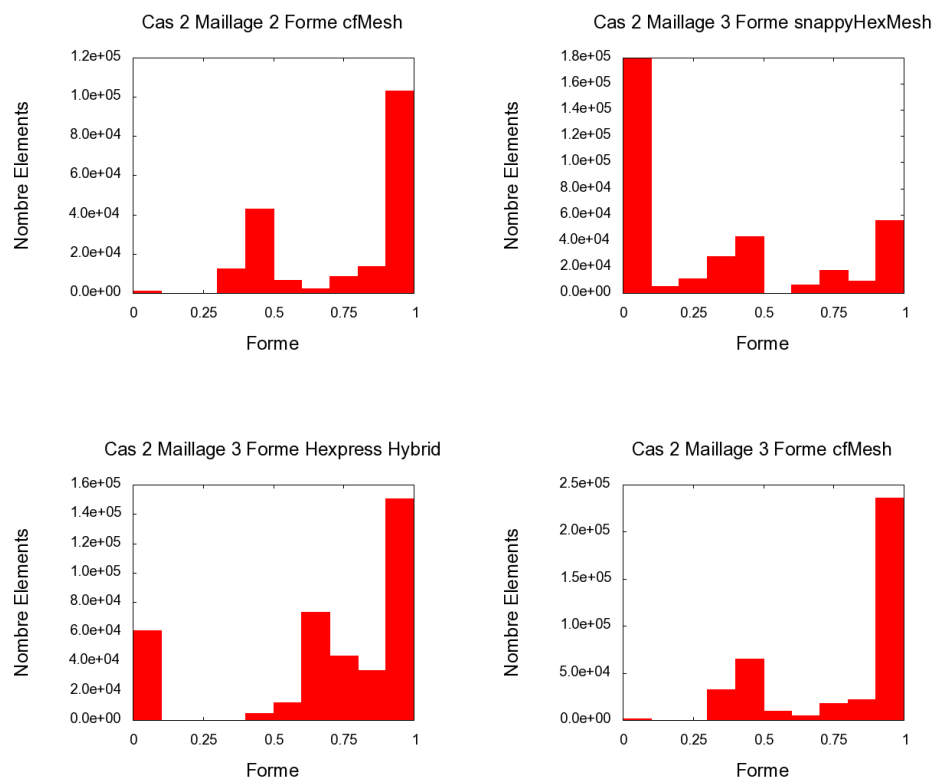


Figure A.10 Distribution Forme Cas 2

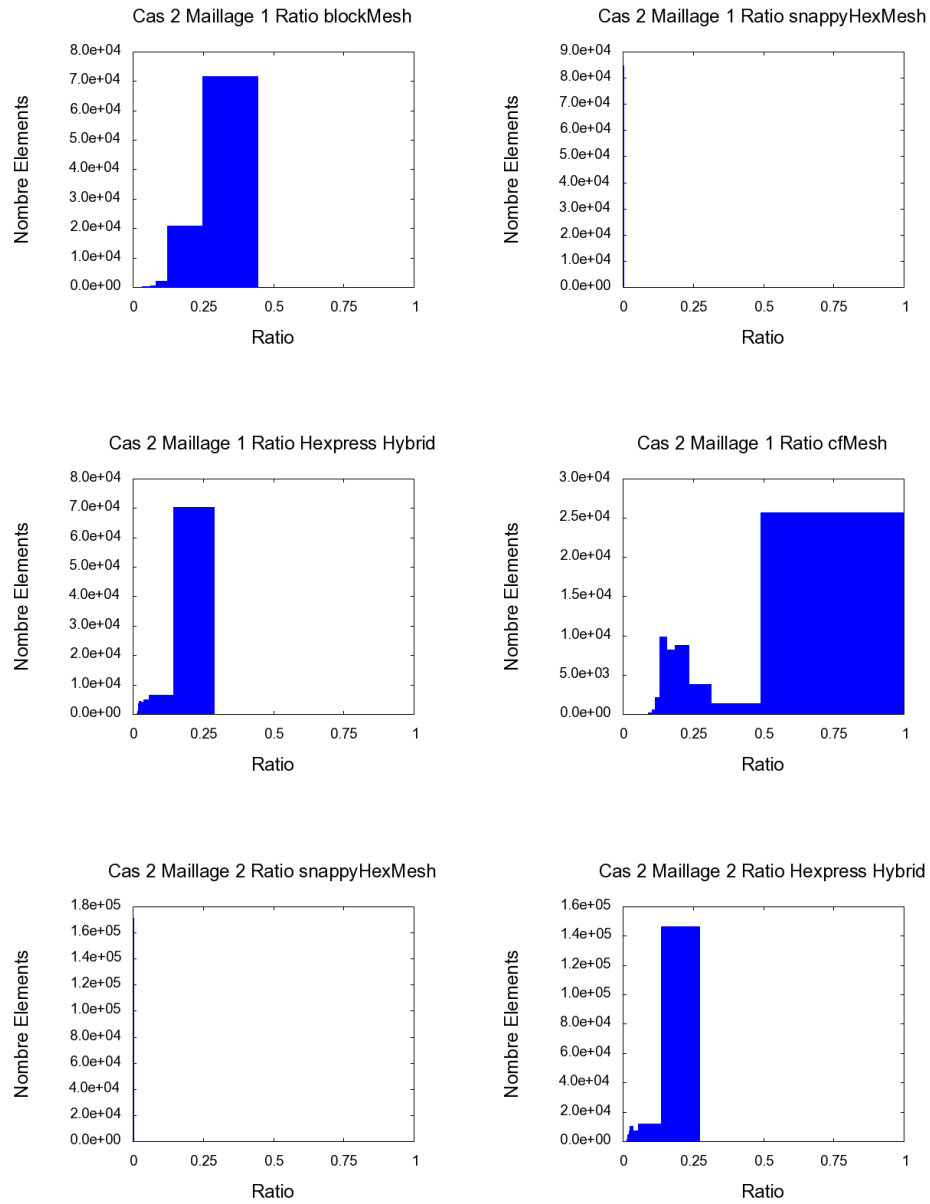


Figure A.11 Distribution Ratio Cas 2

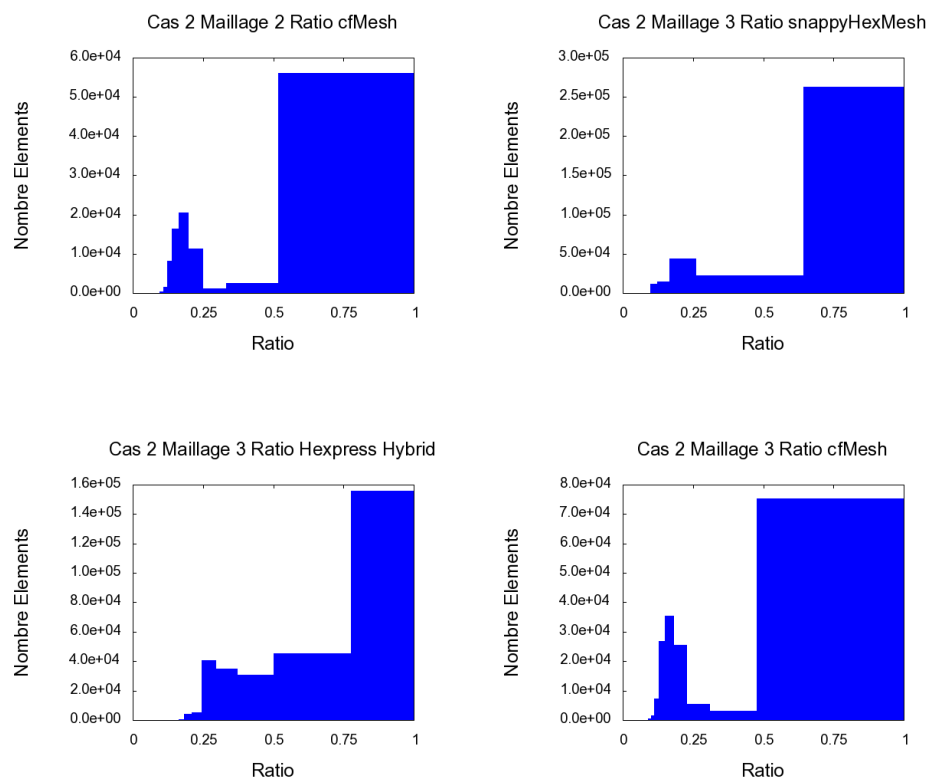


Figure A.12 Distribution Ratio Cas 2

Cas 3

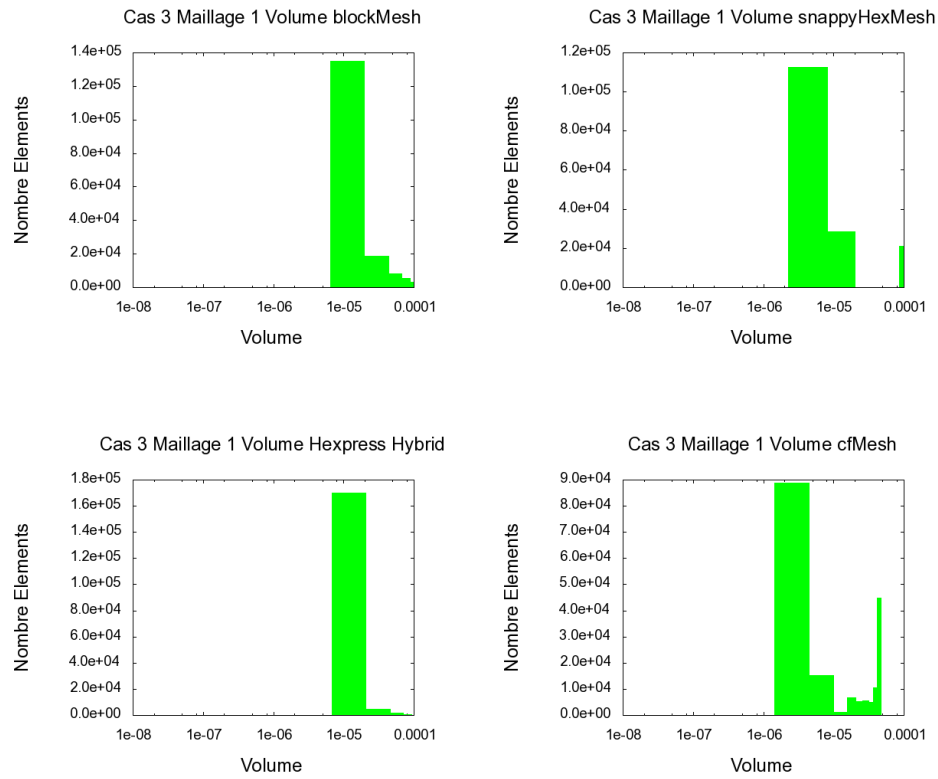


Figure A.13 Distribution Volume Cas 3

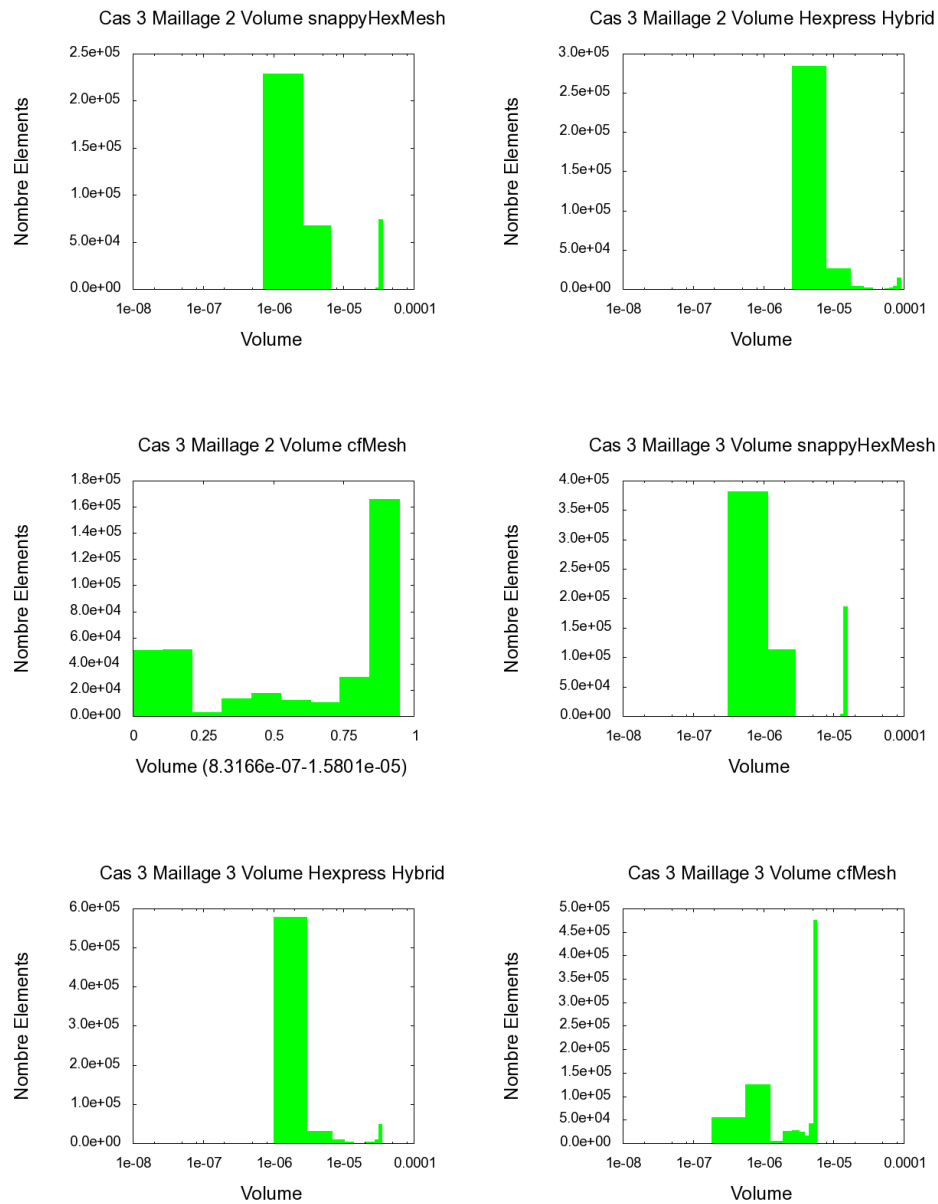


Figure A.14 Distribution Volume Cas 3

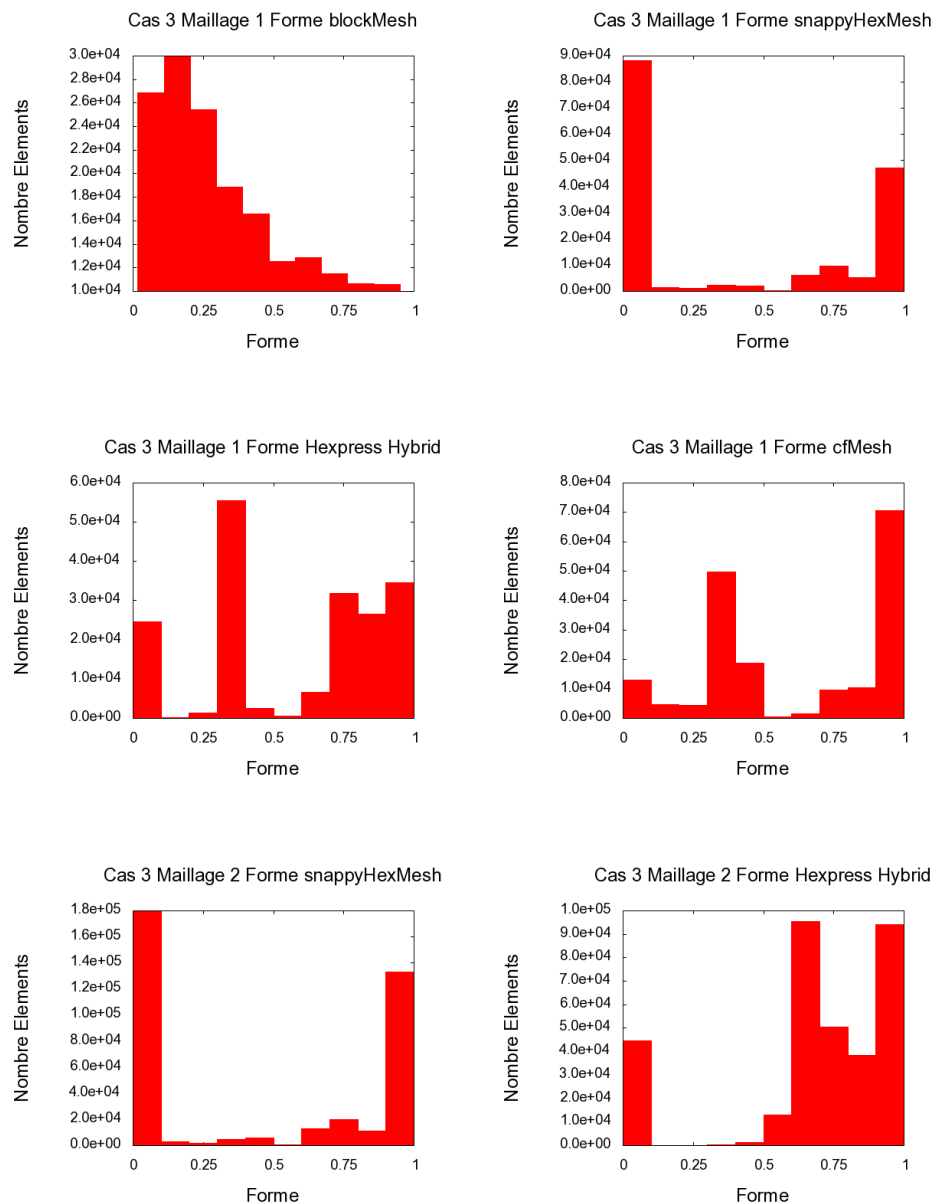


Figure A.15 Distribution Forme Cas 3

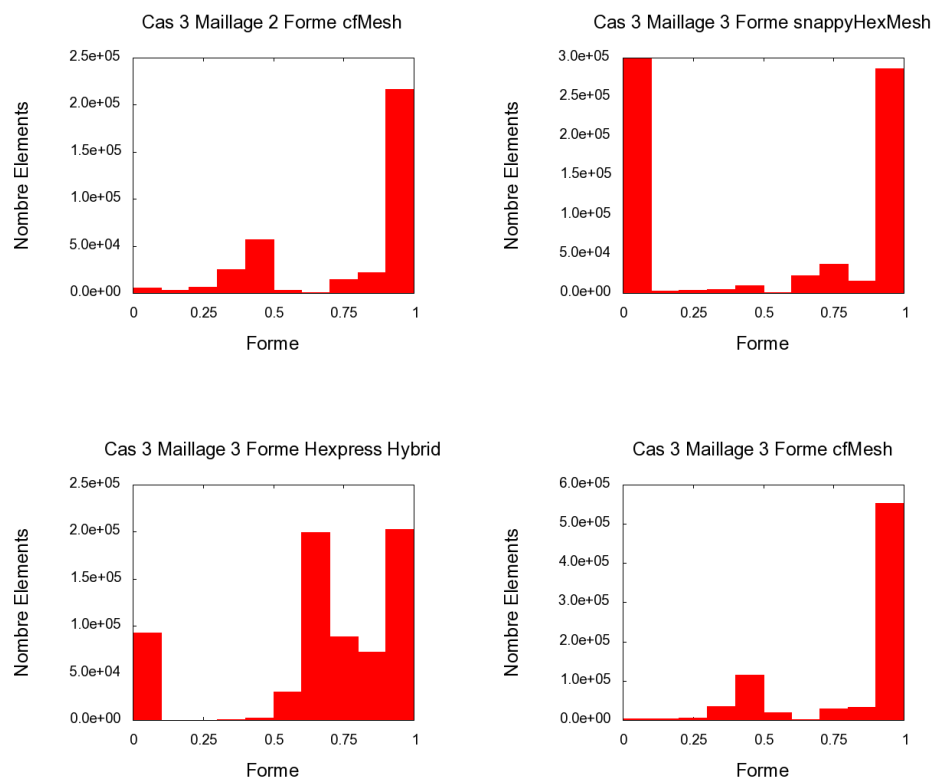


Figure A.16 Distribution Forme Cas 3

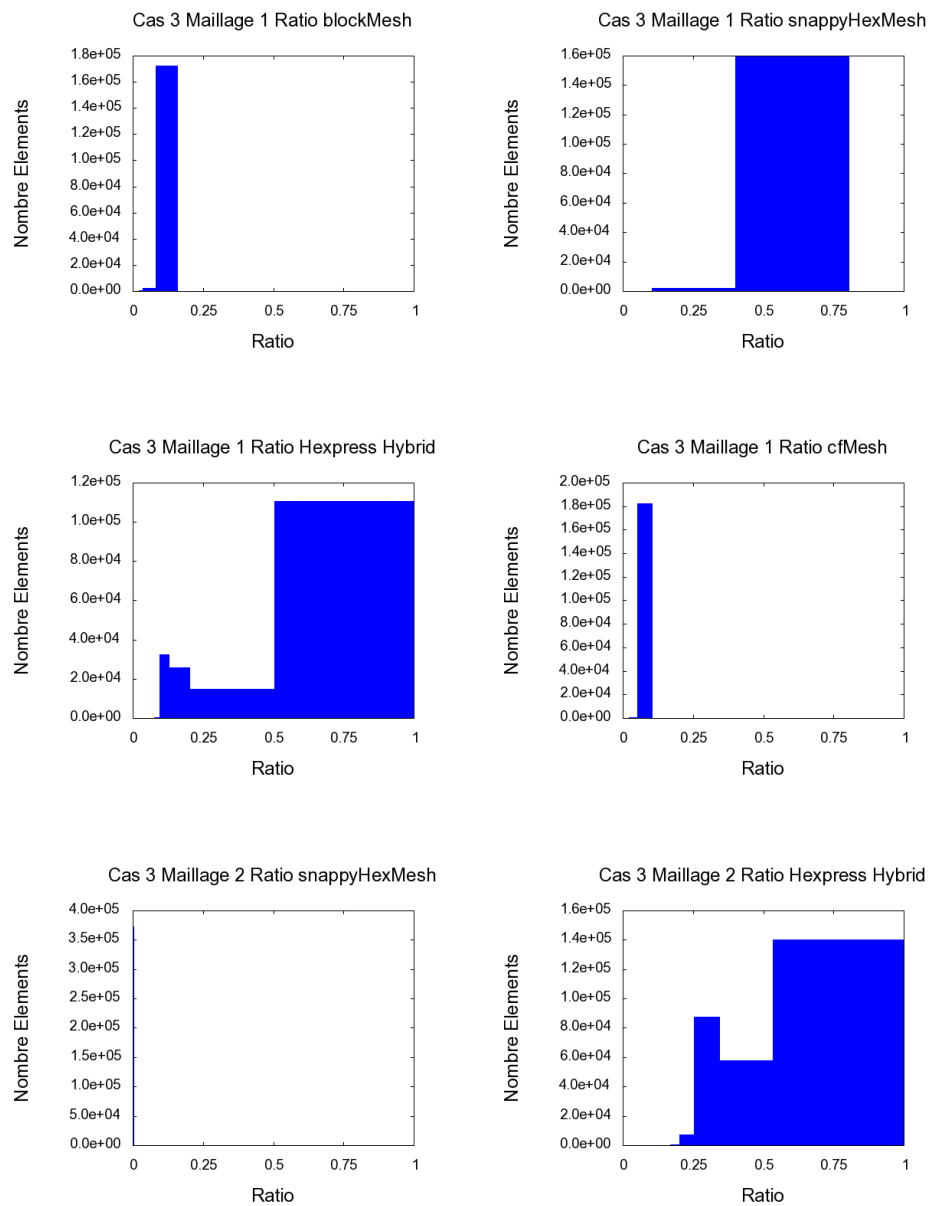


Figure A.17 Distribution Ratio Cas 3

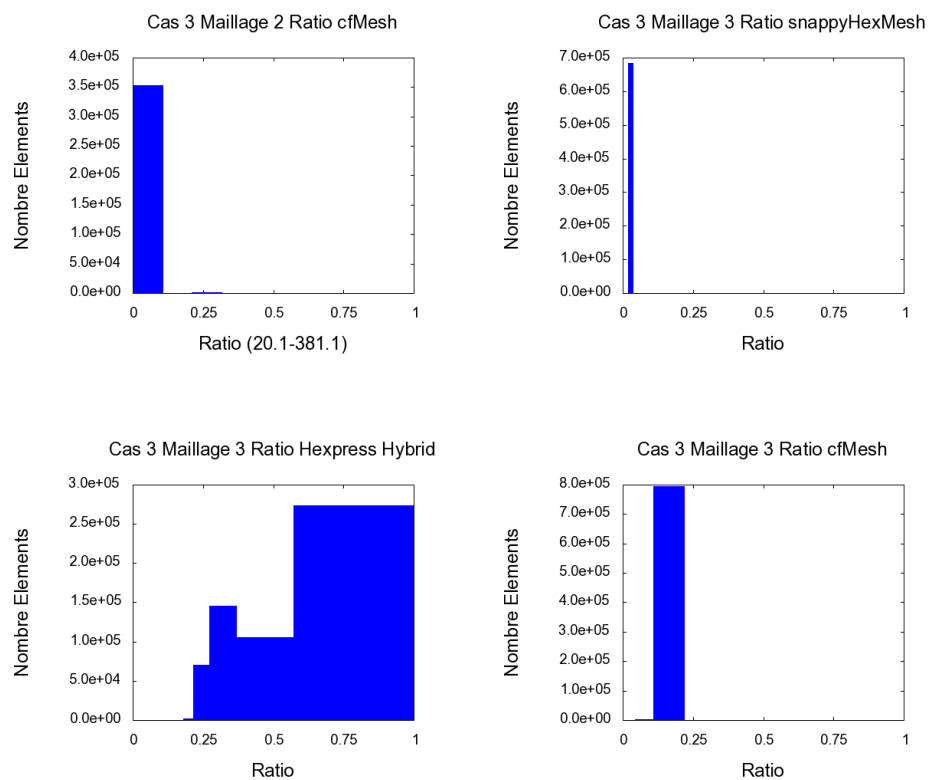


Figure A.18 Distribution Ratio Cas 3

Cas 4

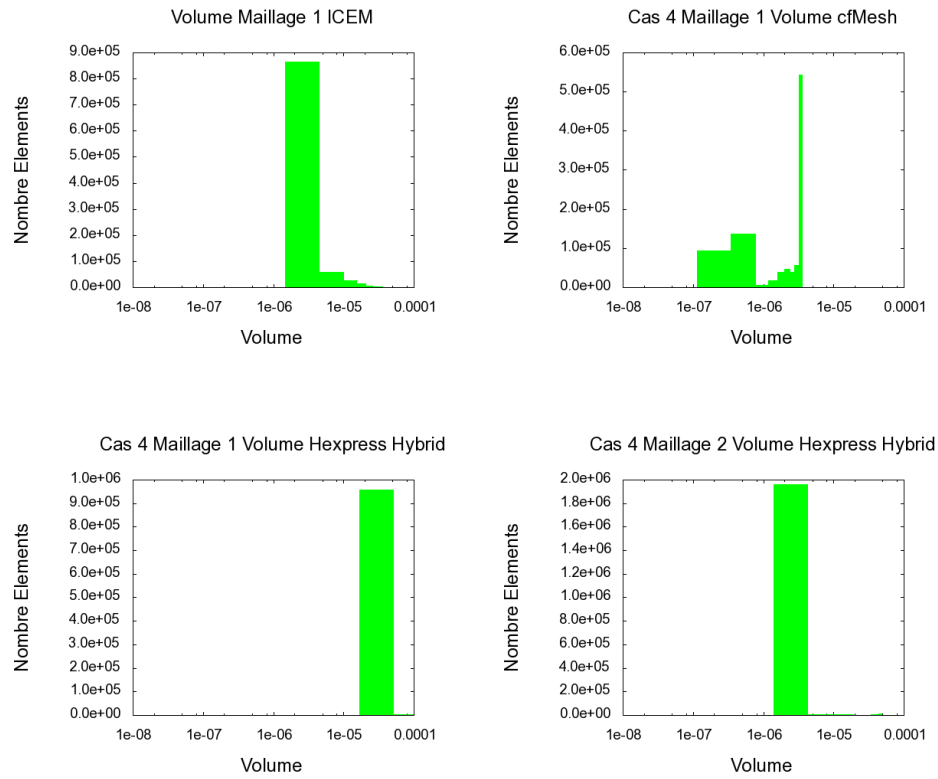


Figure A.19 Distribution Volume Cas 4

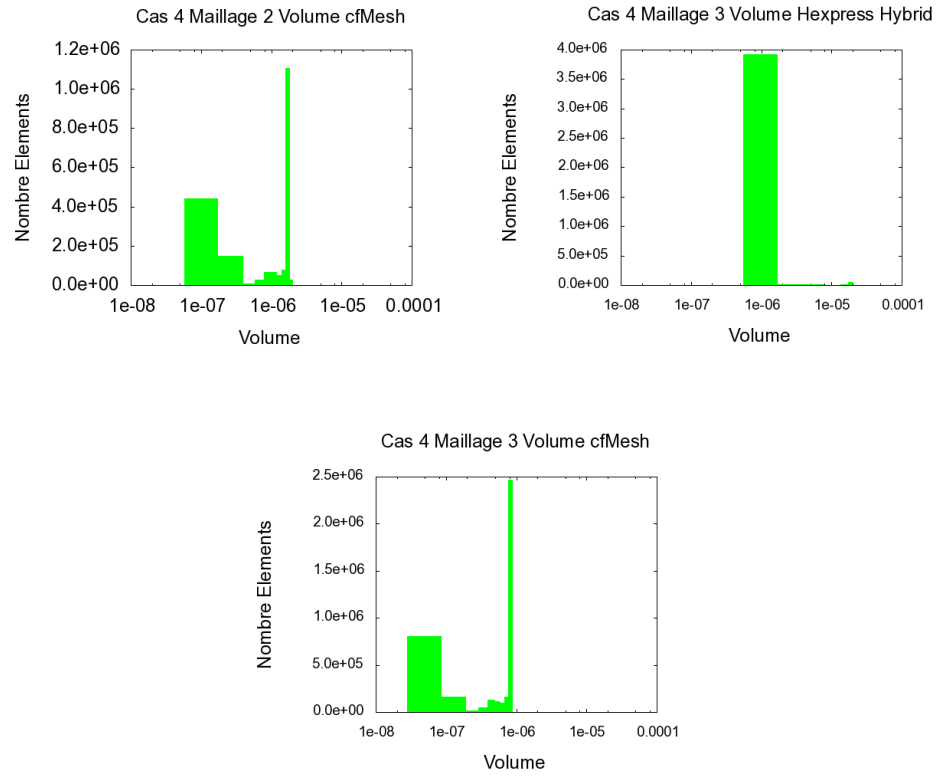


Figure A.20 Distribution Volume Cas 4

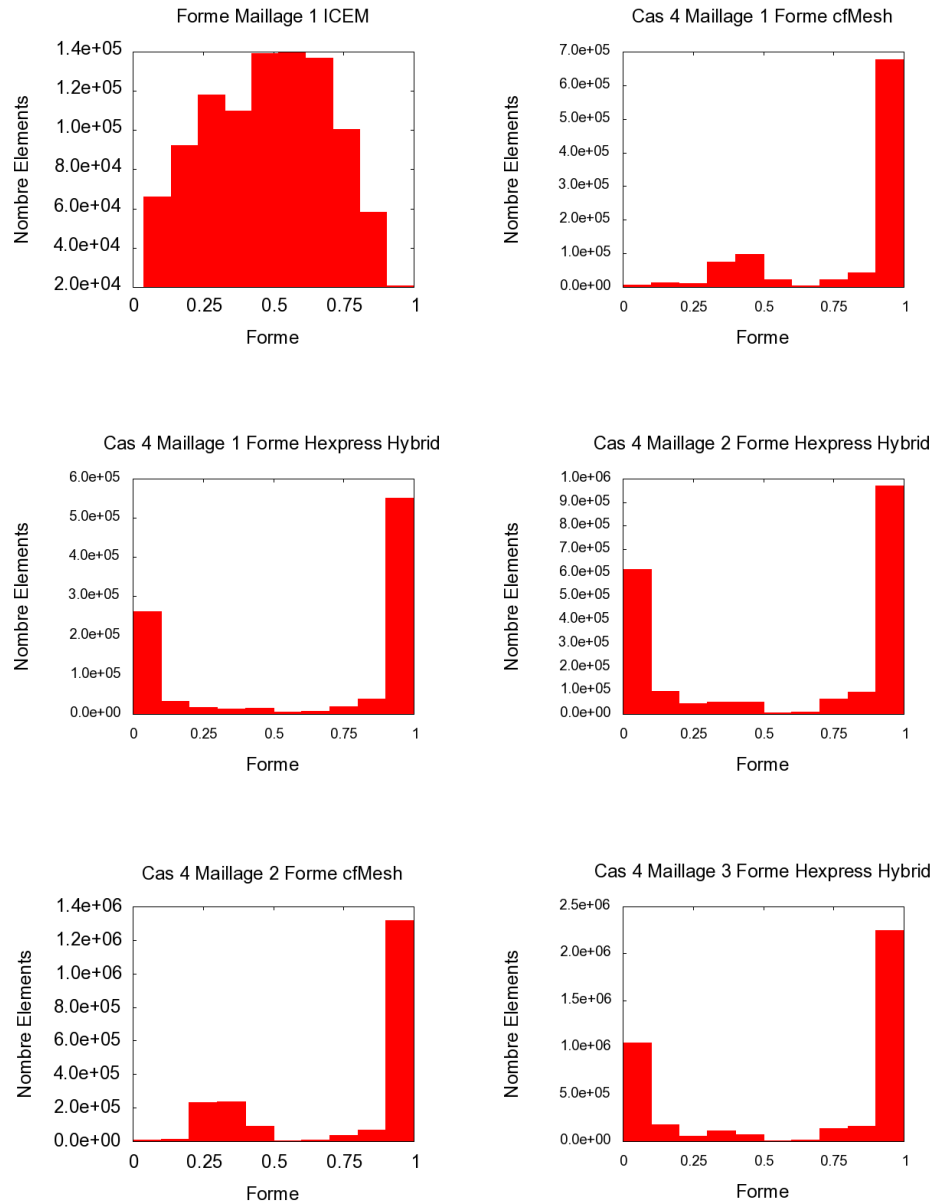


Figure A.21 Distribution Forme Cas 4

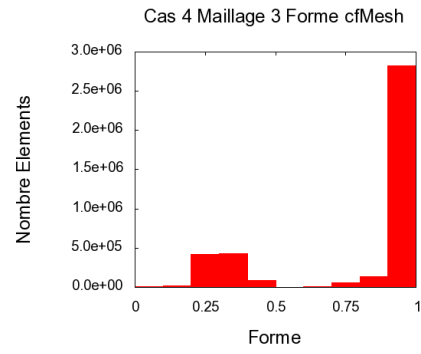


Figure A.22 Distribution Forme Cas 4

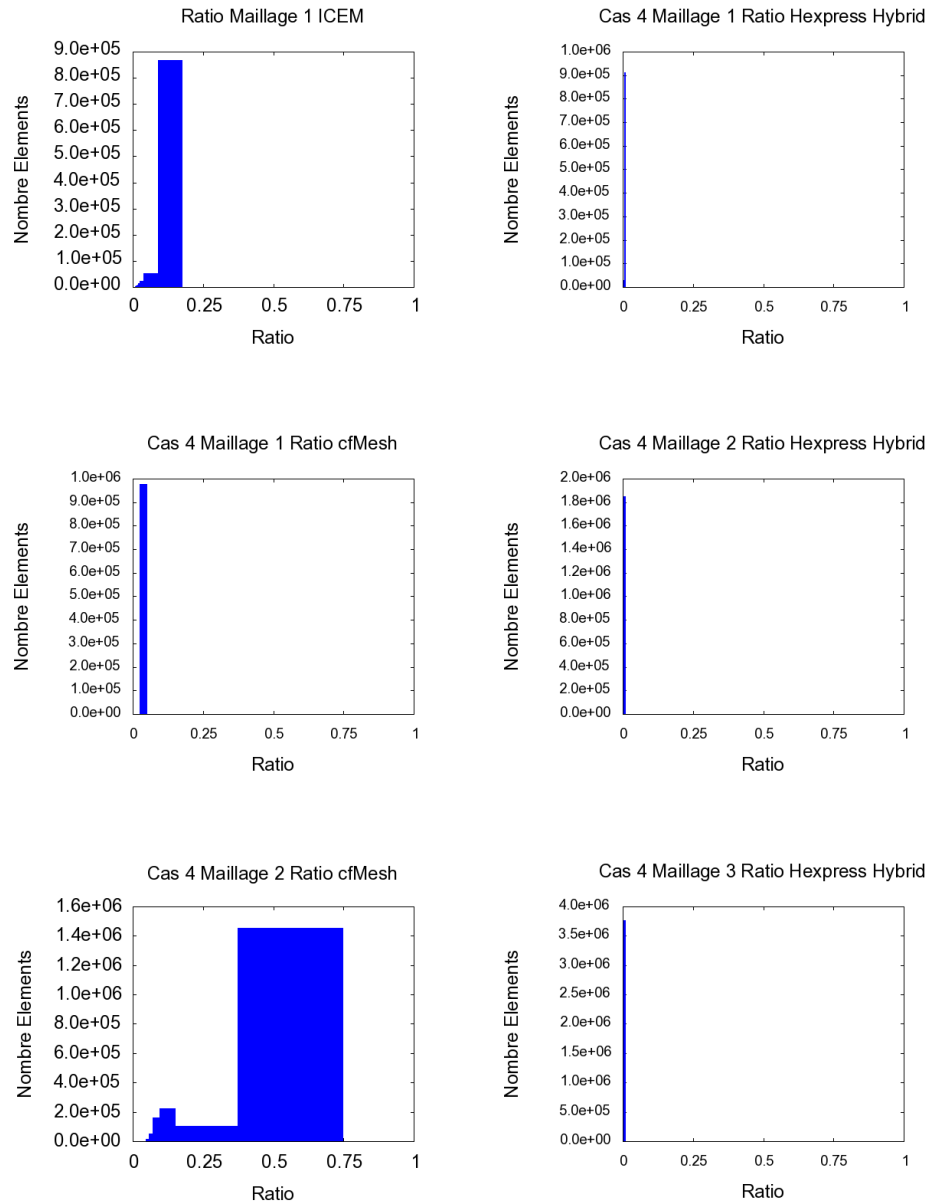


Figure A.23 Distribution Ratio Cas 4

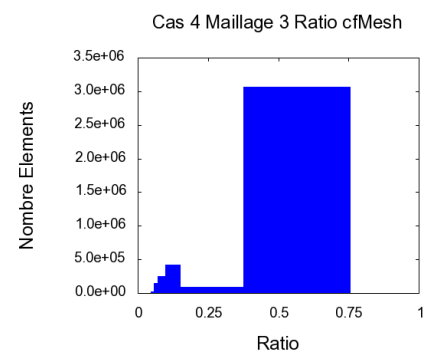


Figure A.24 Distribution Ratio Cas 4

ANNEXE B SOLUTIONS RANS QUATRE CAS

Cas 1

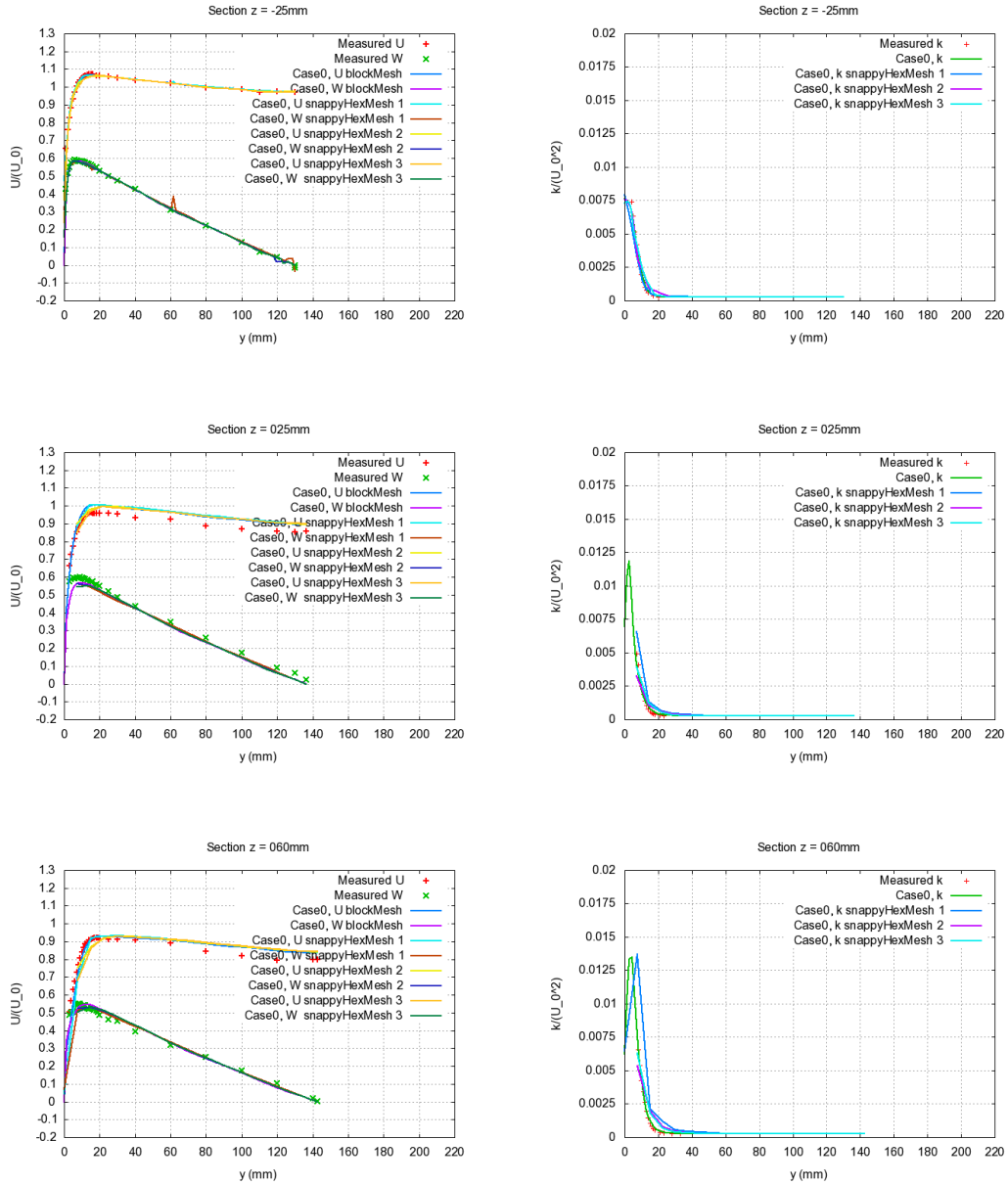


Figure B.1 Solutions RANS Cas 1 maillage snappyHexMesh

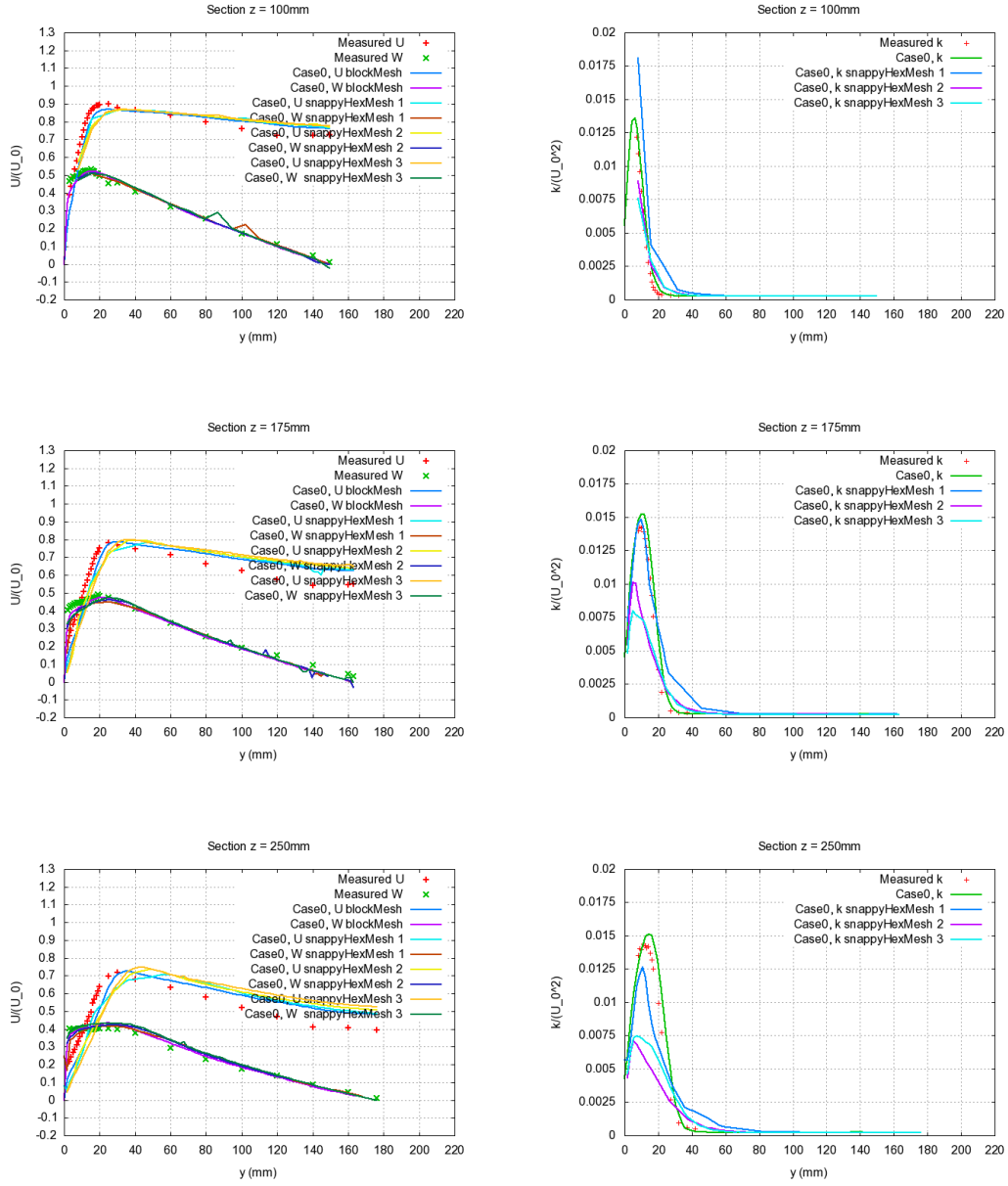


Figure B.2 Solutions RANS Cas 1 maillage snappyHexMesh

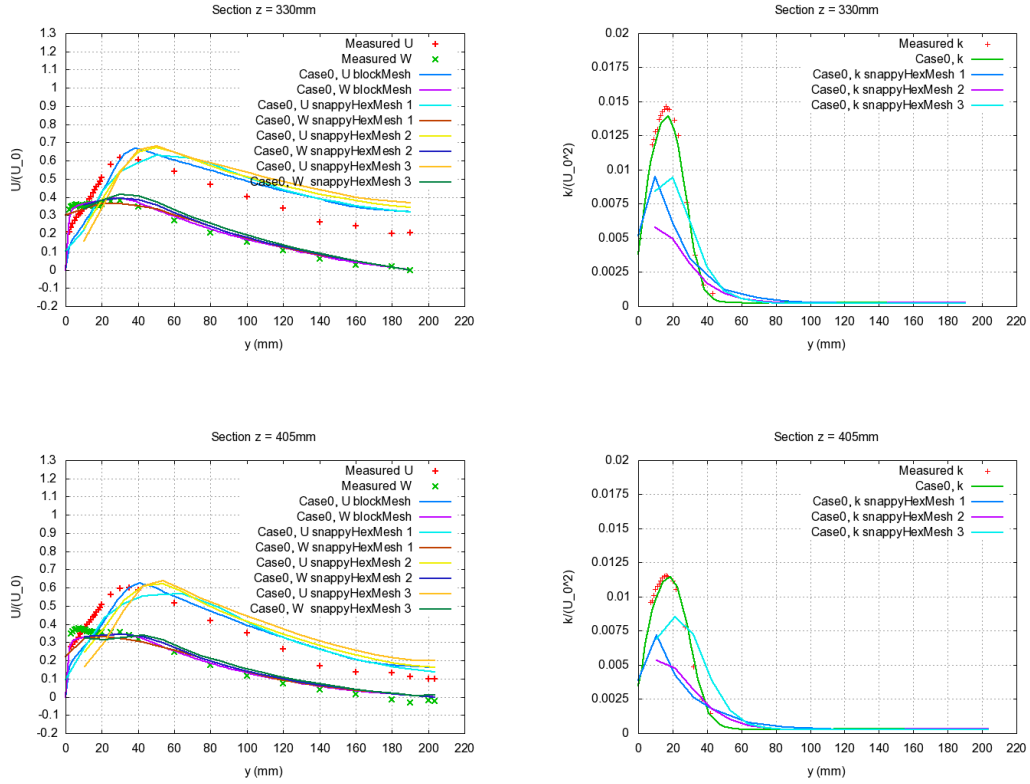


Figure B.3 Solutions RANS Cas 1 maillage snappyHexMesh

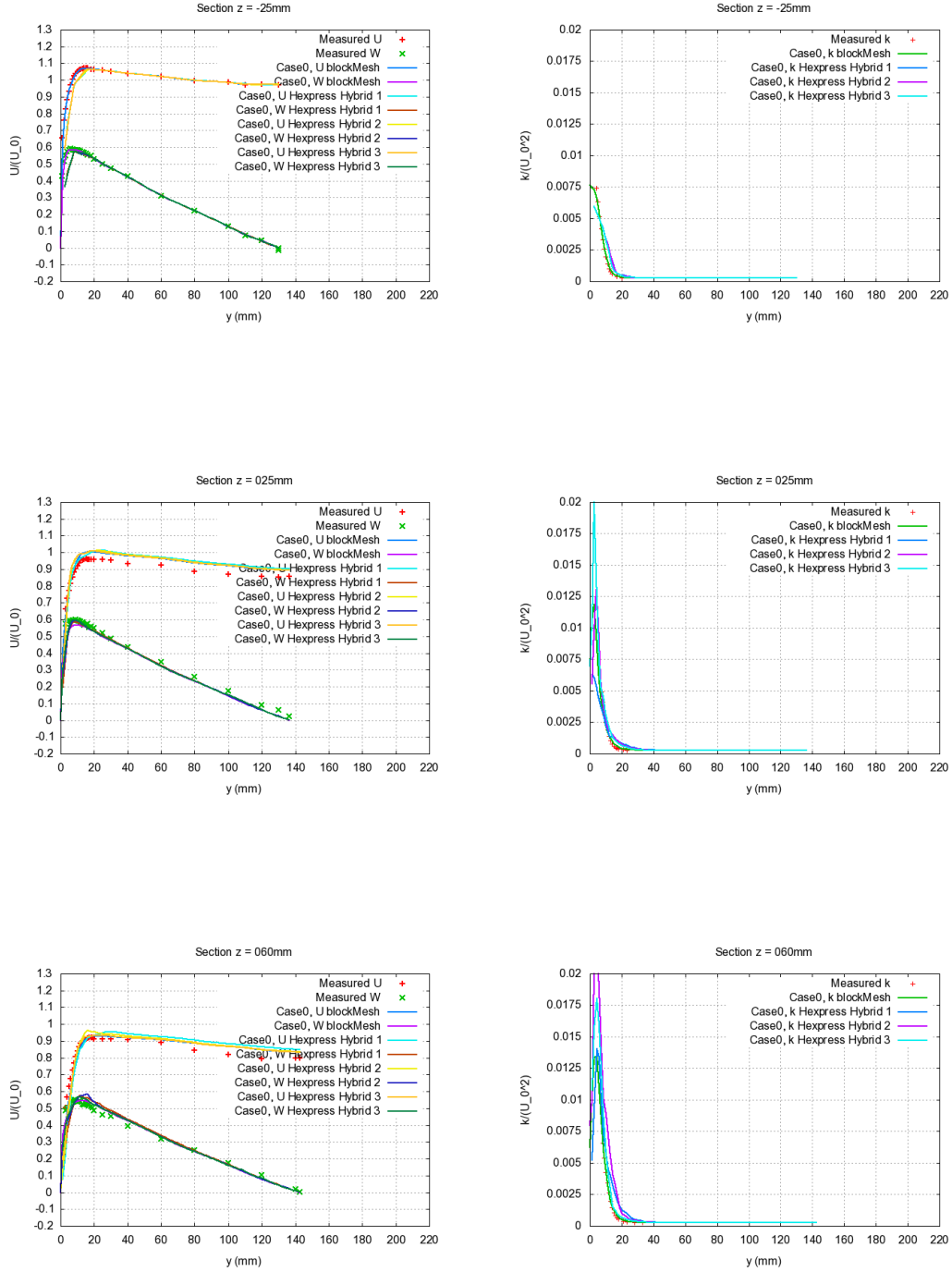


Figure B.4 Solutions RANS Cas 1 maillage Hexpress Hybrid

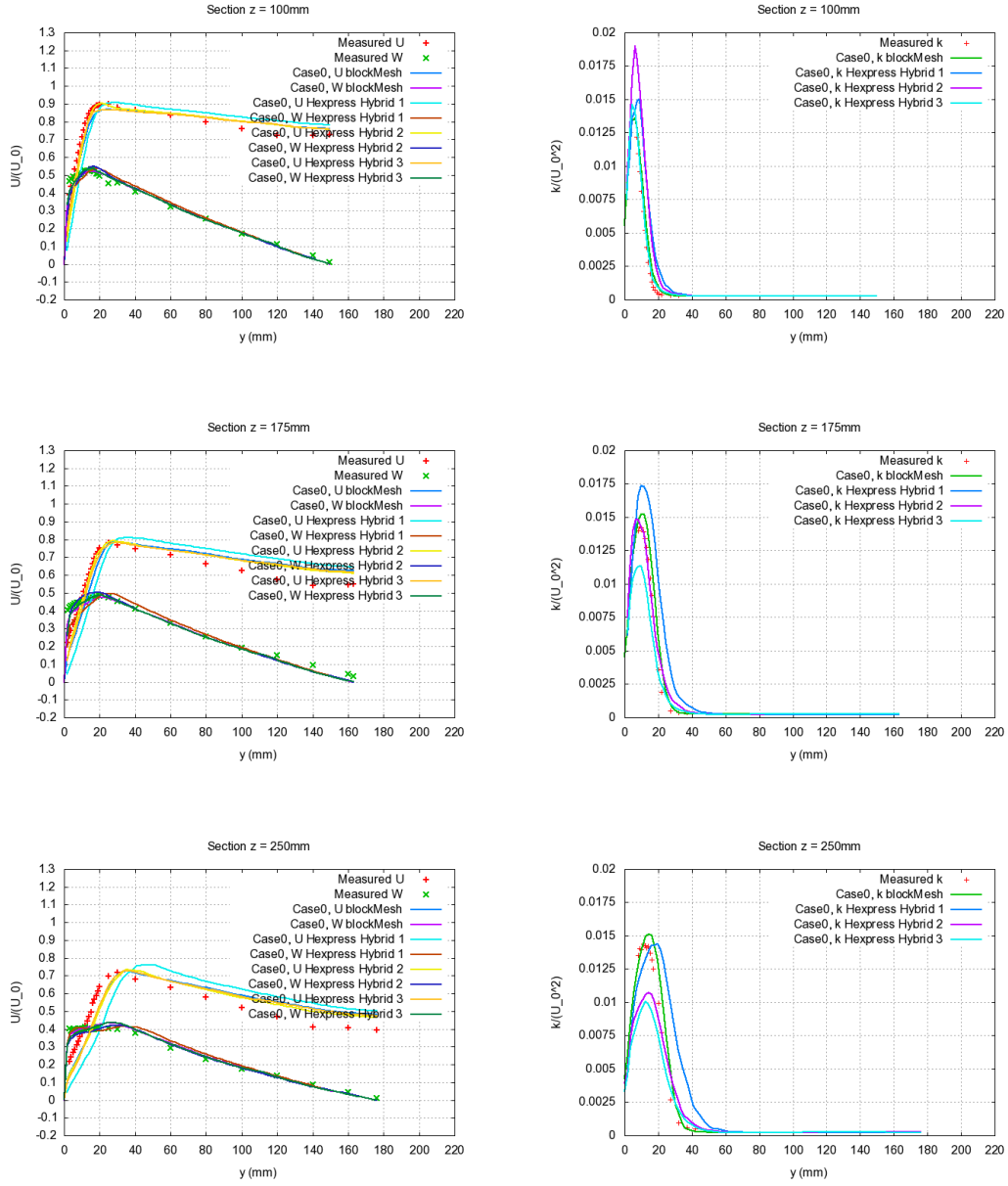


Figure B.5 Solutions RANS Cas 1 maillage Hexpress Hybrid

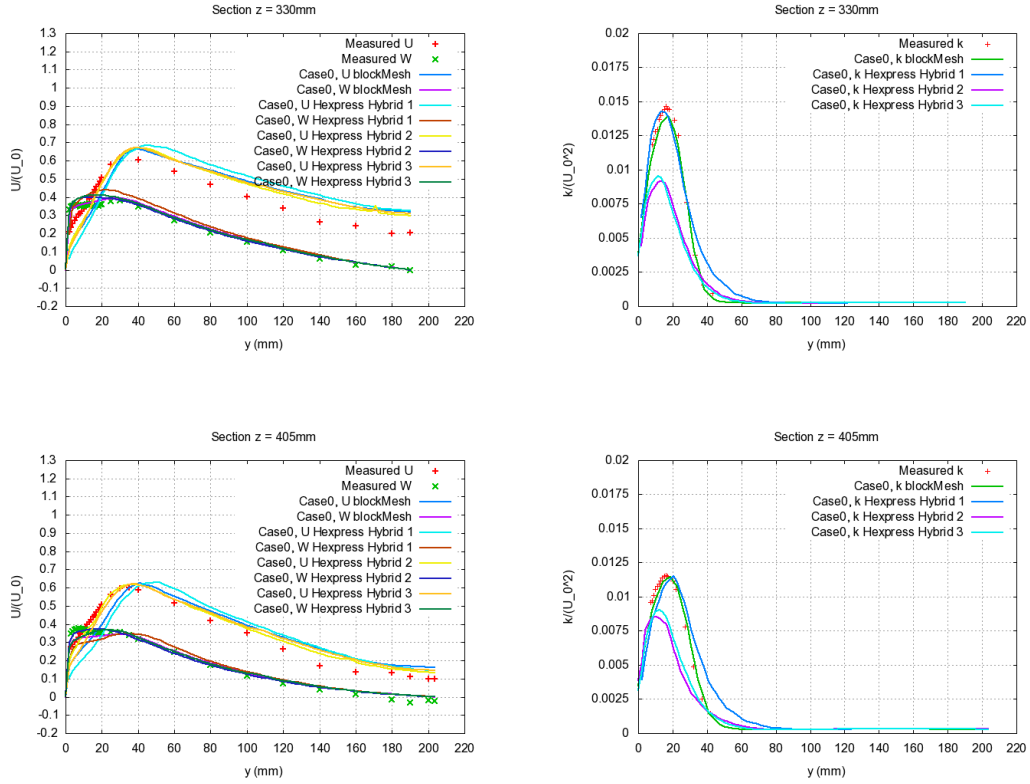


Figure B.6 Solutions RANS Cas 1 maillage Hexpress Hybrid

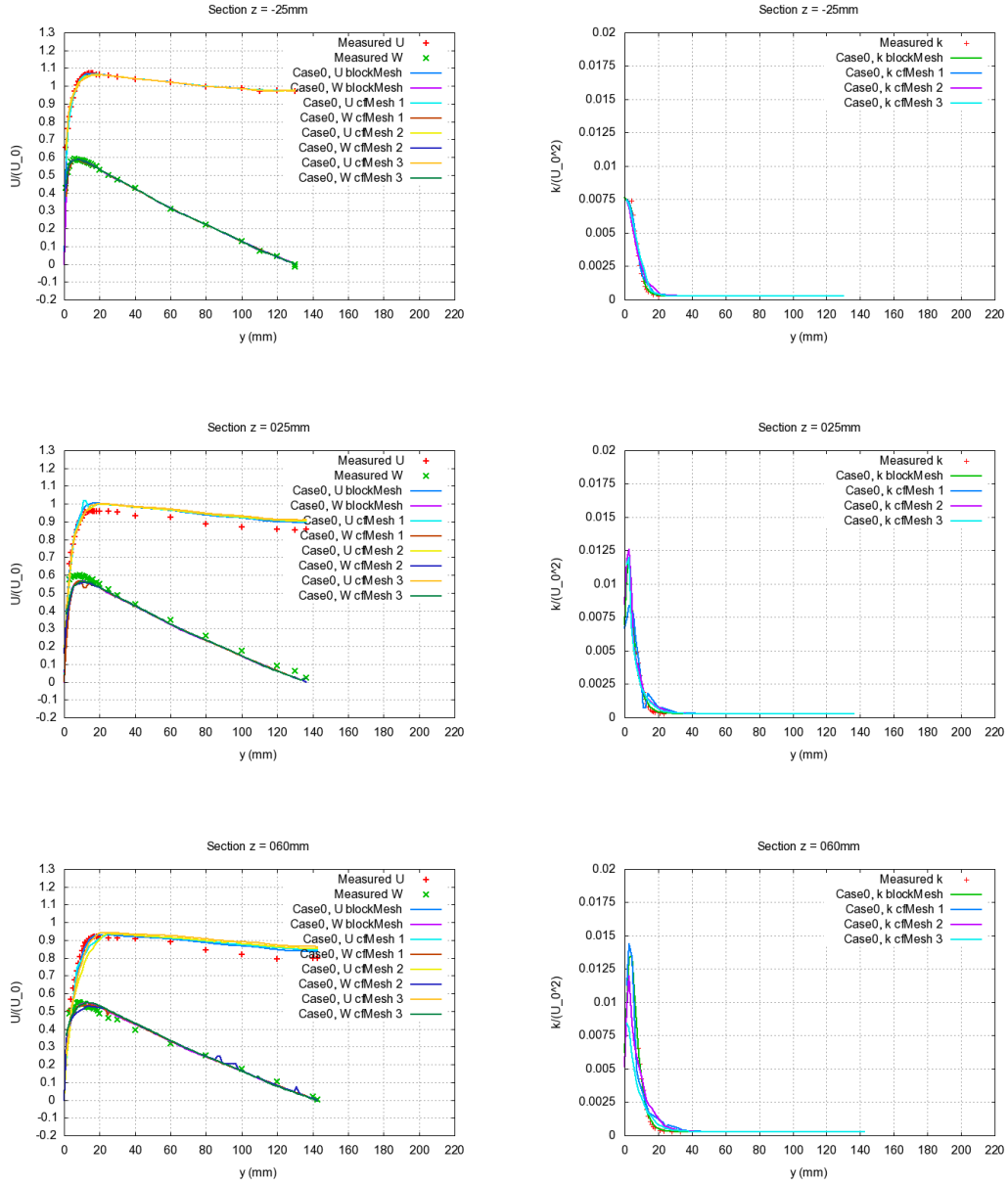


Figure B.7 Solutions RANS Cas 1 maillage cf Mesh

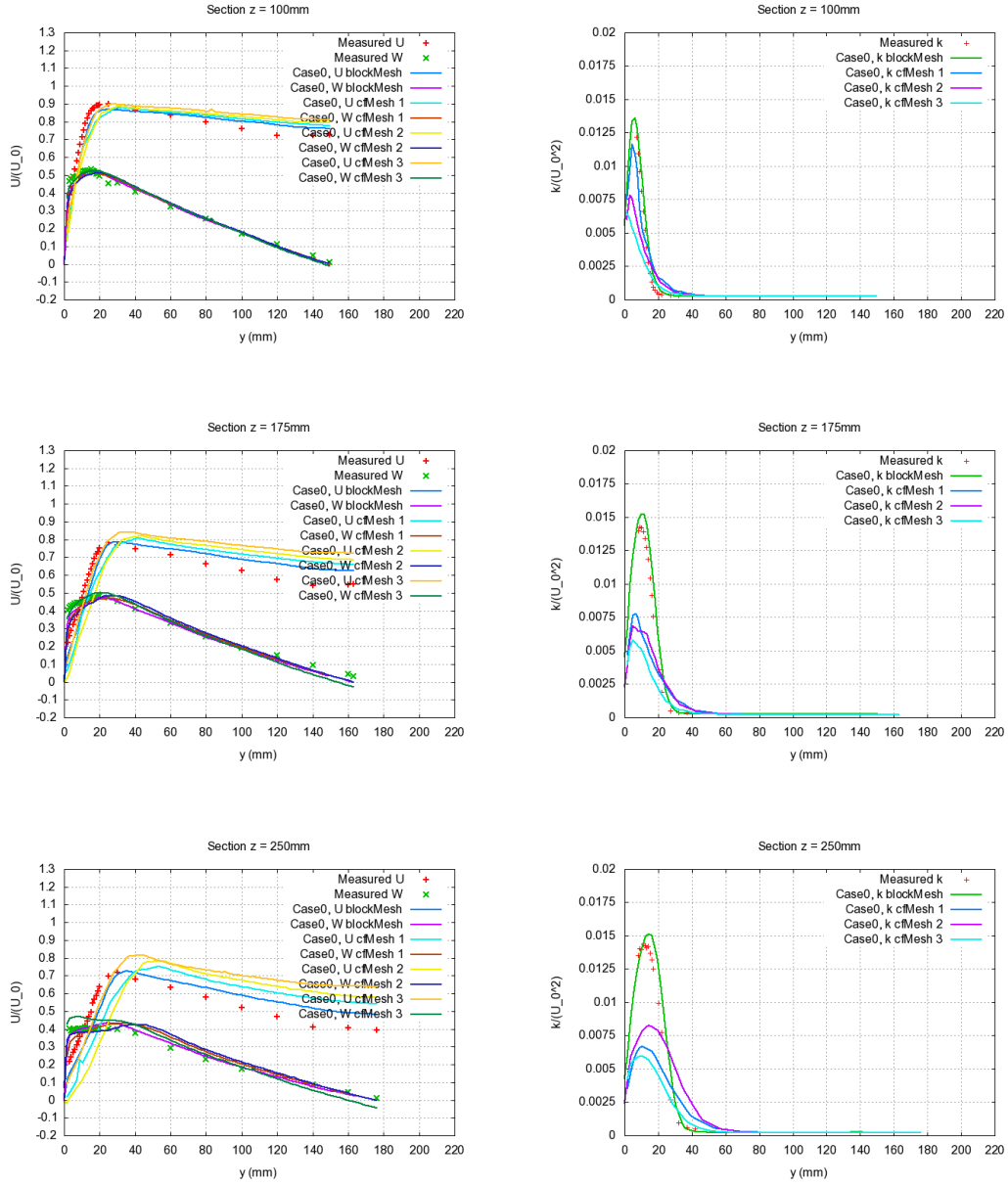


Figure B.8 Solutions RANS Cas 1 maillage cf Mesh

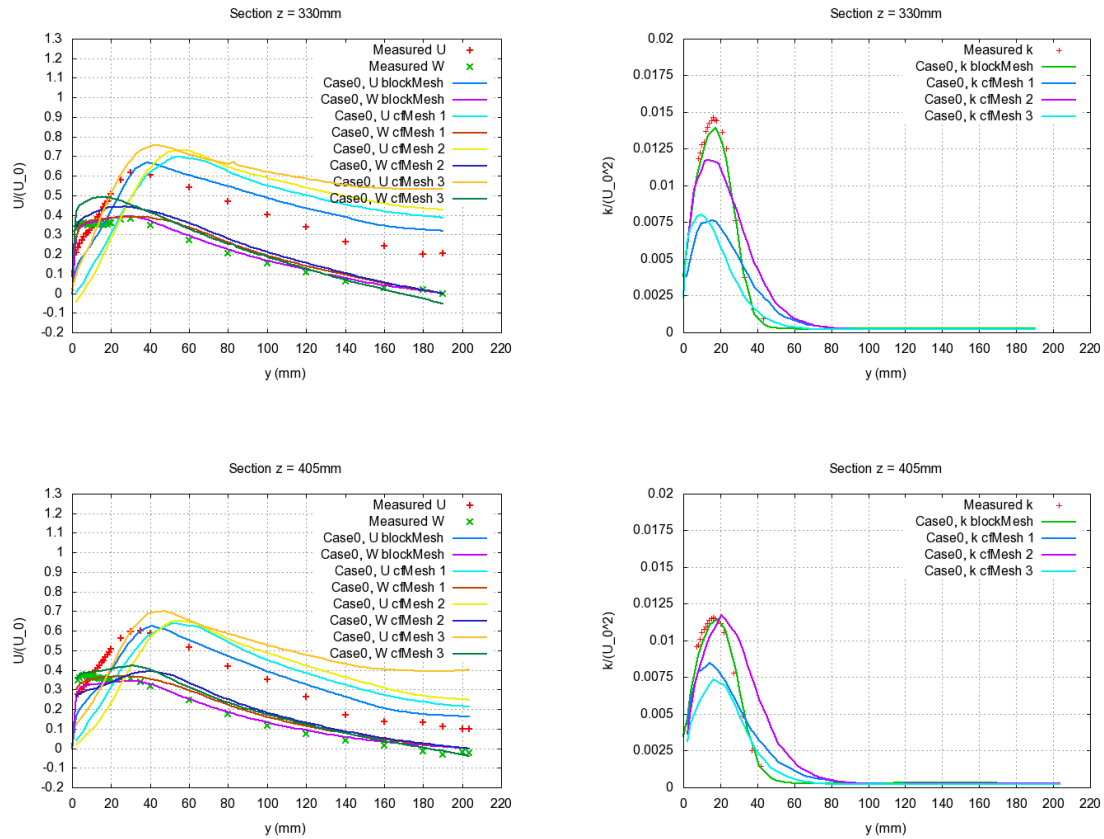


Figure B.9 Solutions RANS Cas 1 maillage cf Mesh

Cas 2

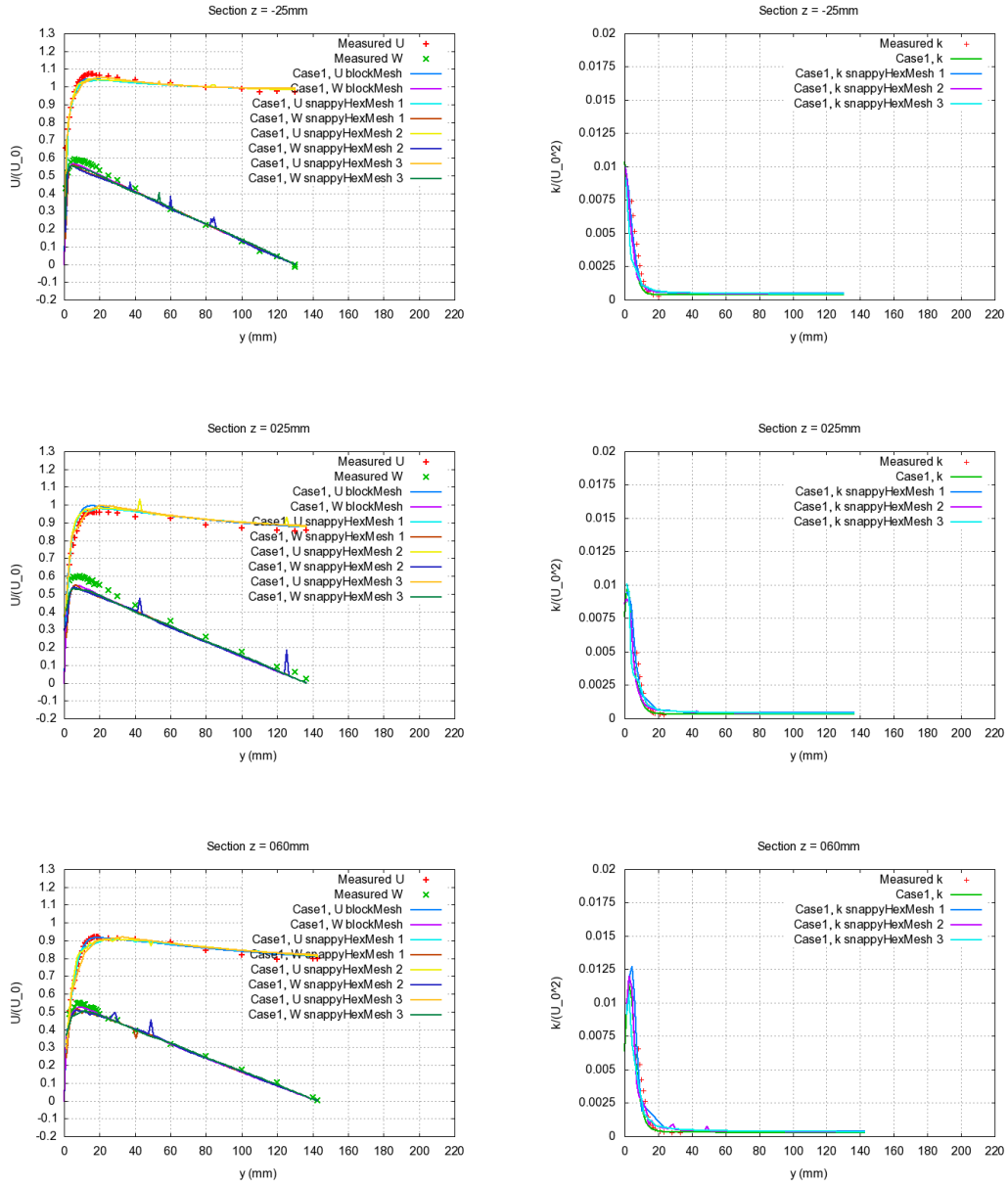


Figure B.10 Solutions RANS Cas 2 maillage snappyHexMesh

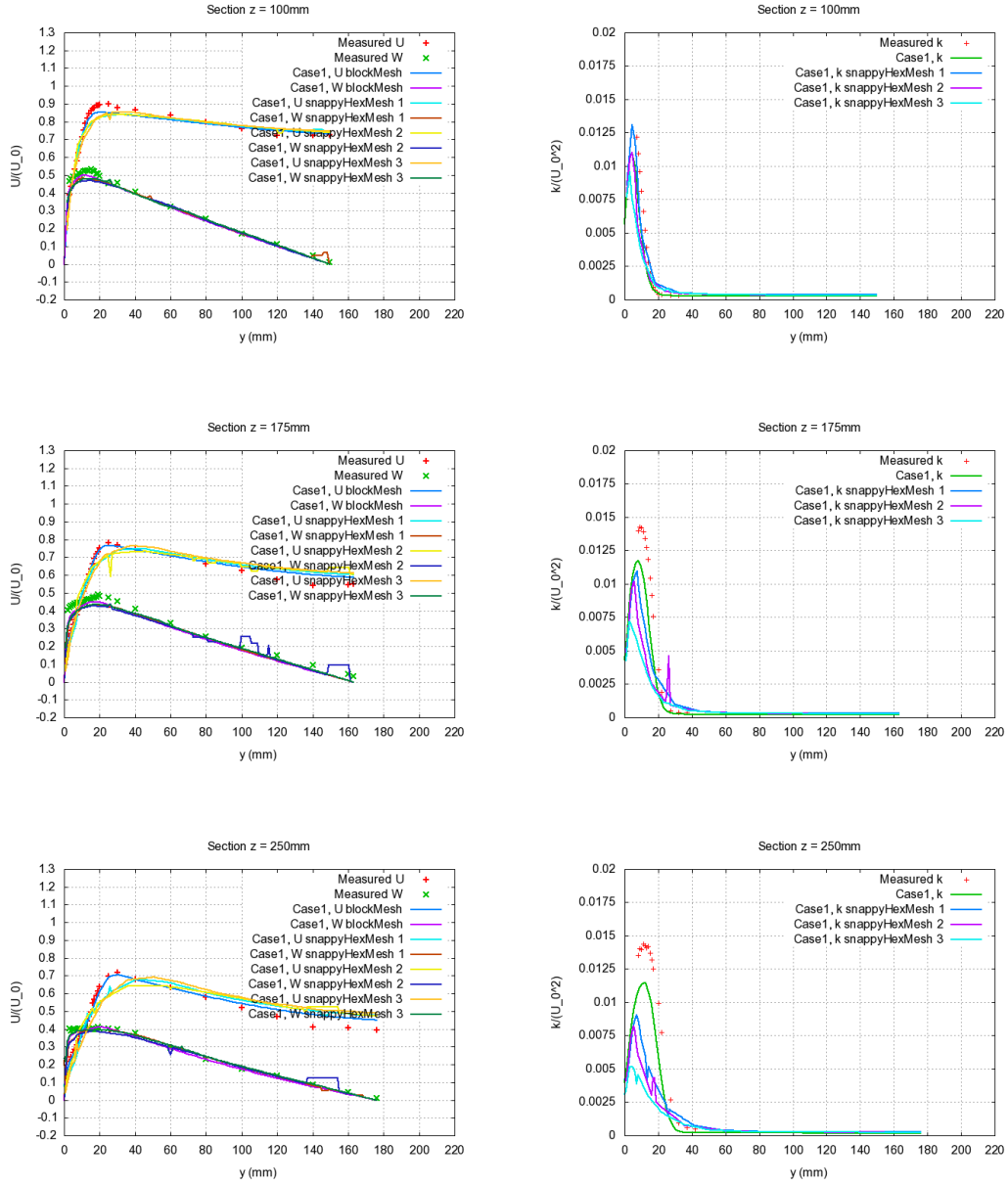


Figure B.11 Solutions RANS Cas 2 maillage snappyHexMesh

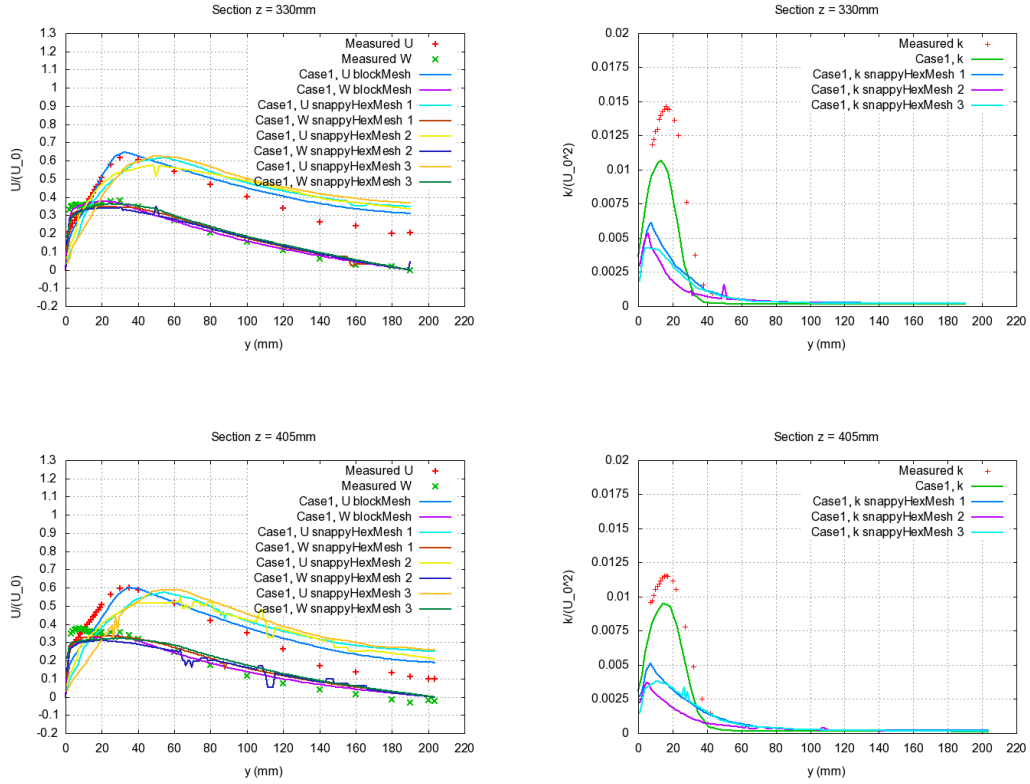


Figure B.12 Solutions RANS Cas 2 maillage snappyHexMesh

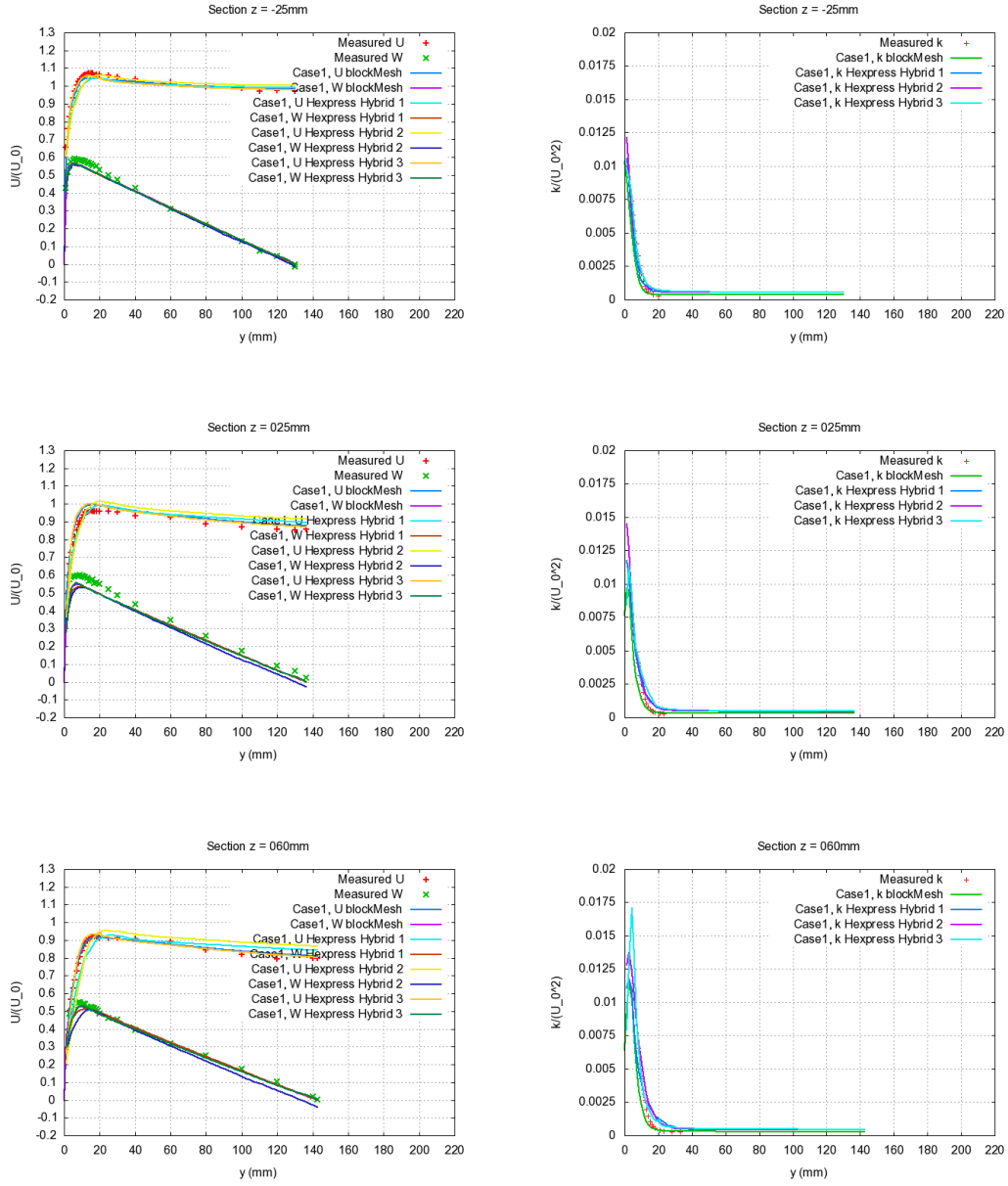


Figure B.13 Solutions RANS Cas 2 maillage Hexpress Hybrid

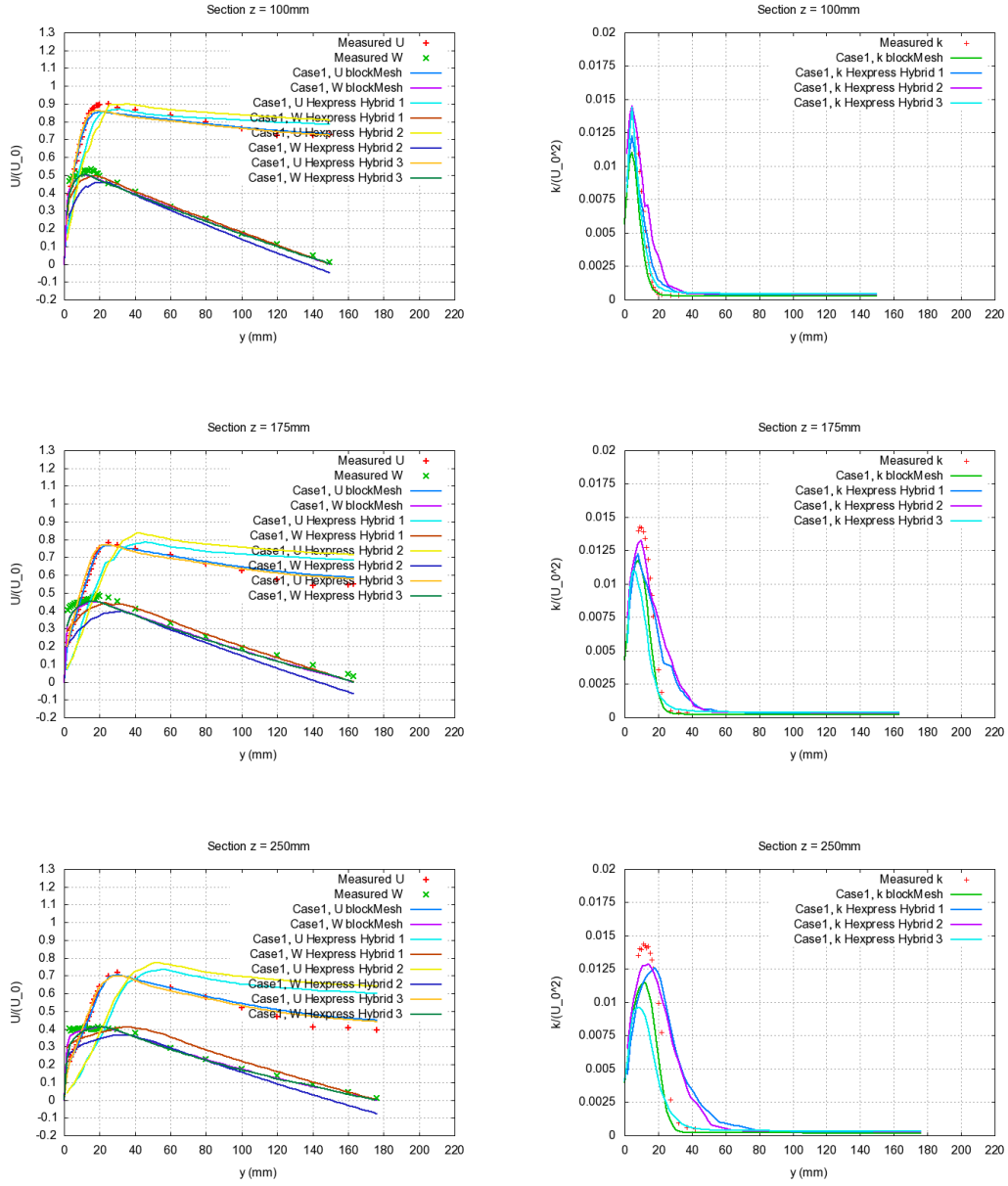


Figure B.14 Solutions RANS Cas 2 maillage Hexpress Hybrid

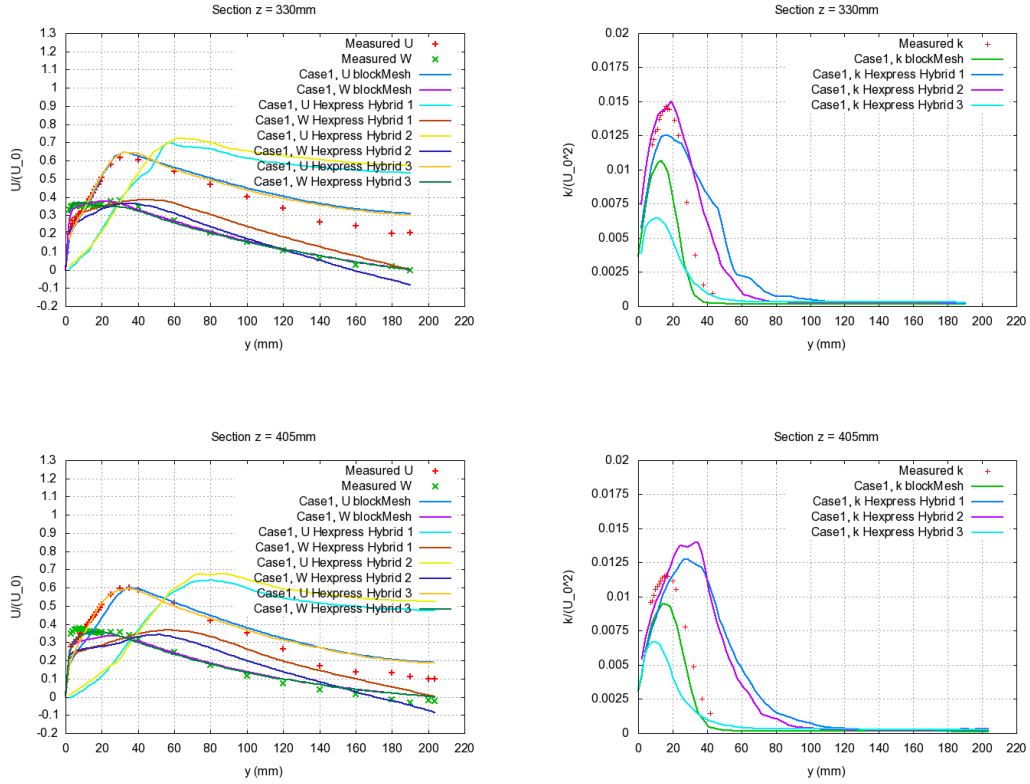


Figure B.15 Solutions RANS Cas 2 maillage Hexpress Hybrid

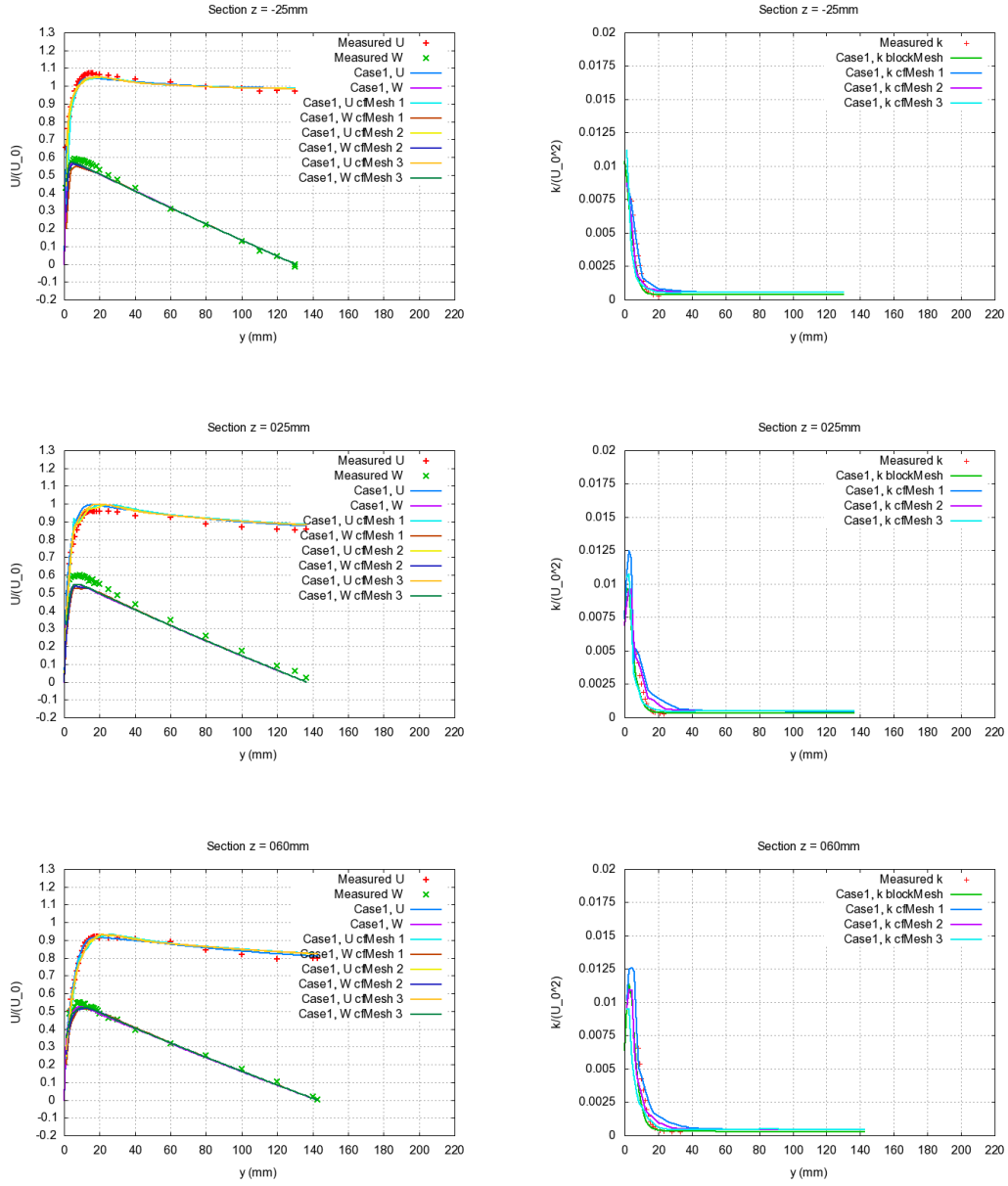


Figure B.16 Solutions RANS Cas 2 maillage cf Mesh

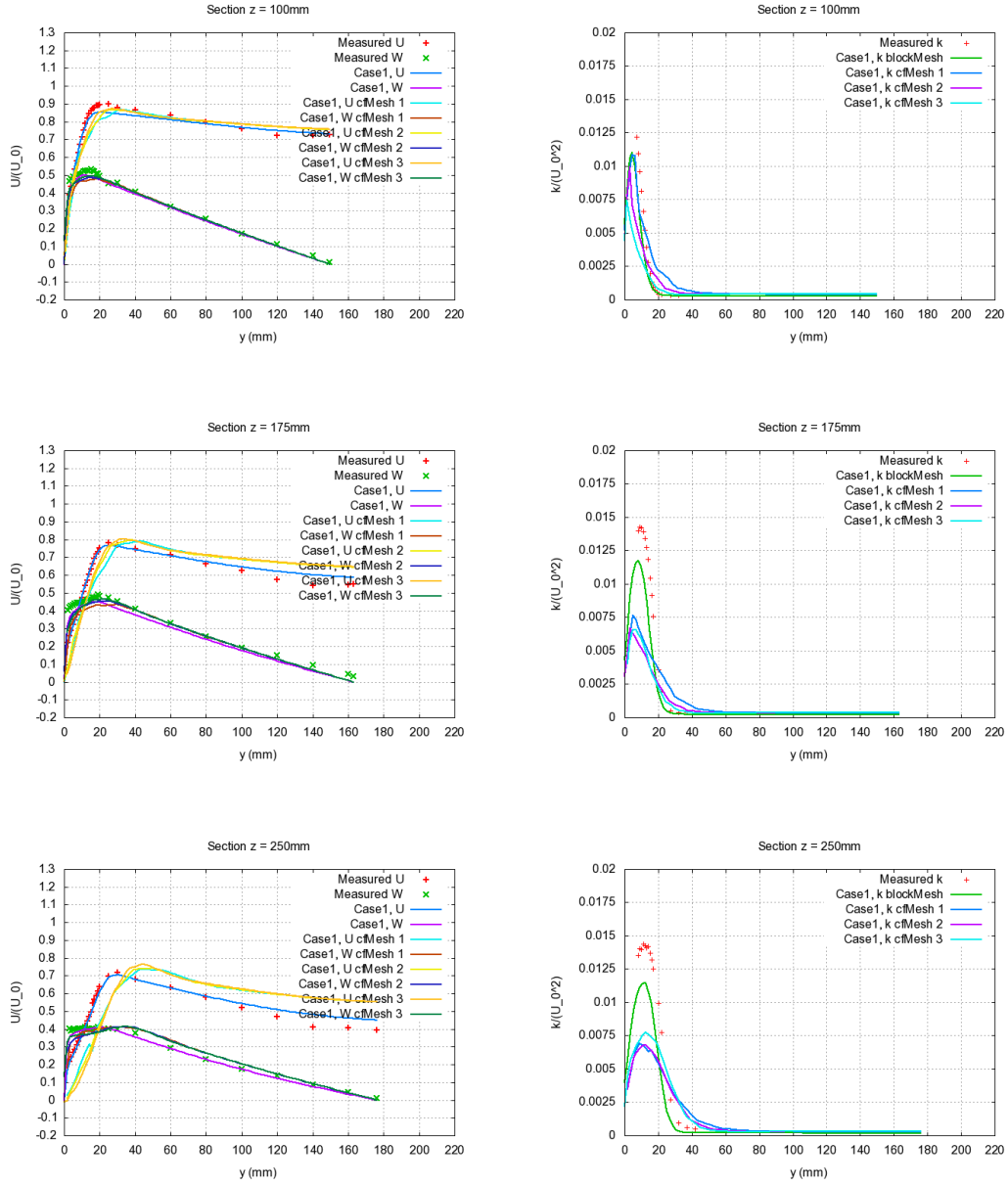


Figure B.17 Solutions RANS Cas 2 maillage cf Mesh

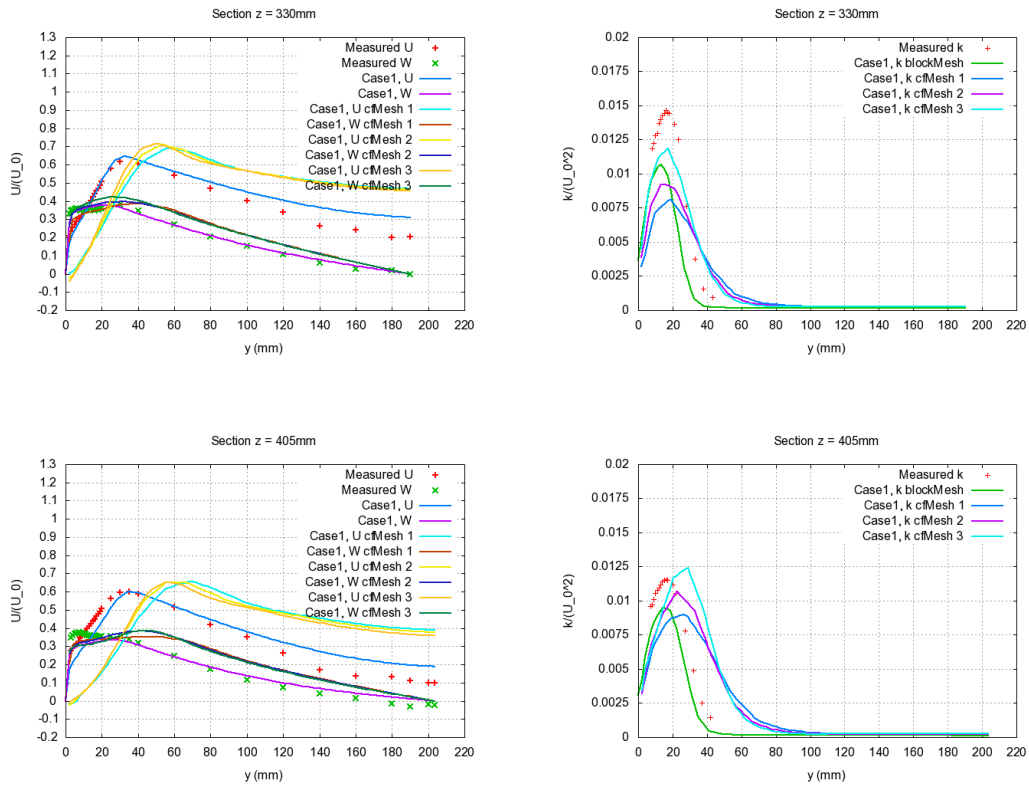


Figure B.18 Solutions RANS Cas 2 maillage cf Mesh

Cas 3

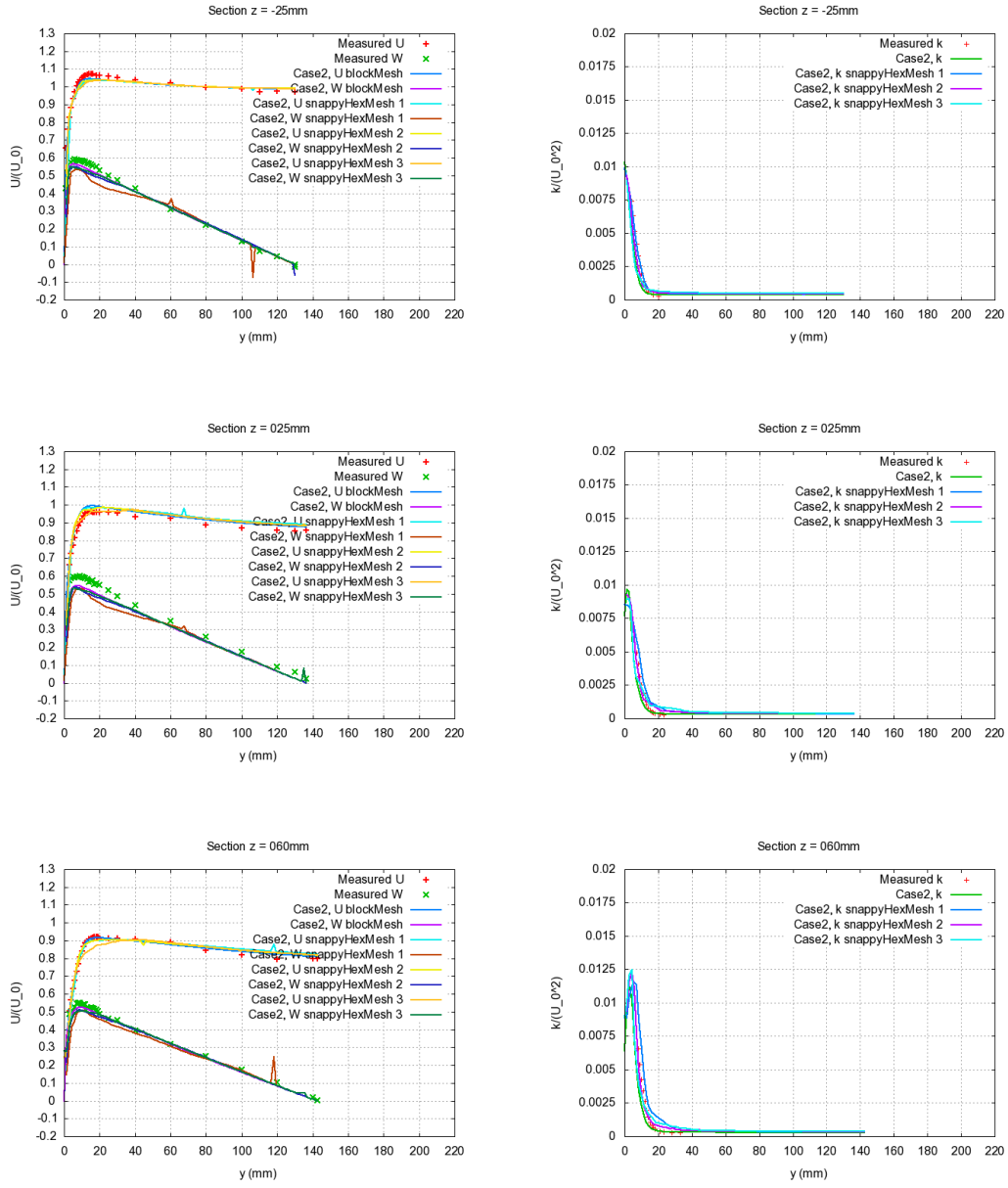


Figure B.19 Solutions RANS Cas 3 maillage snappyHexMesh

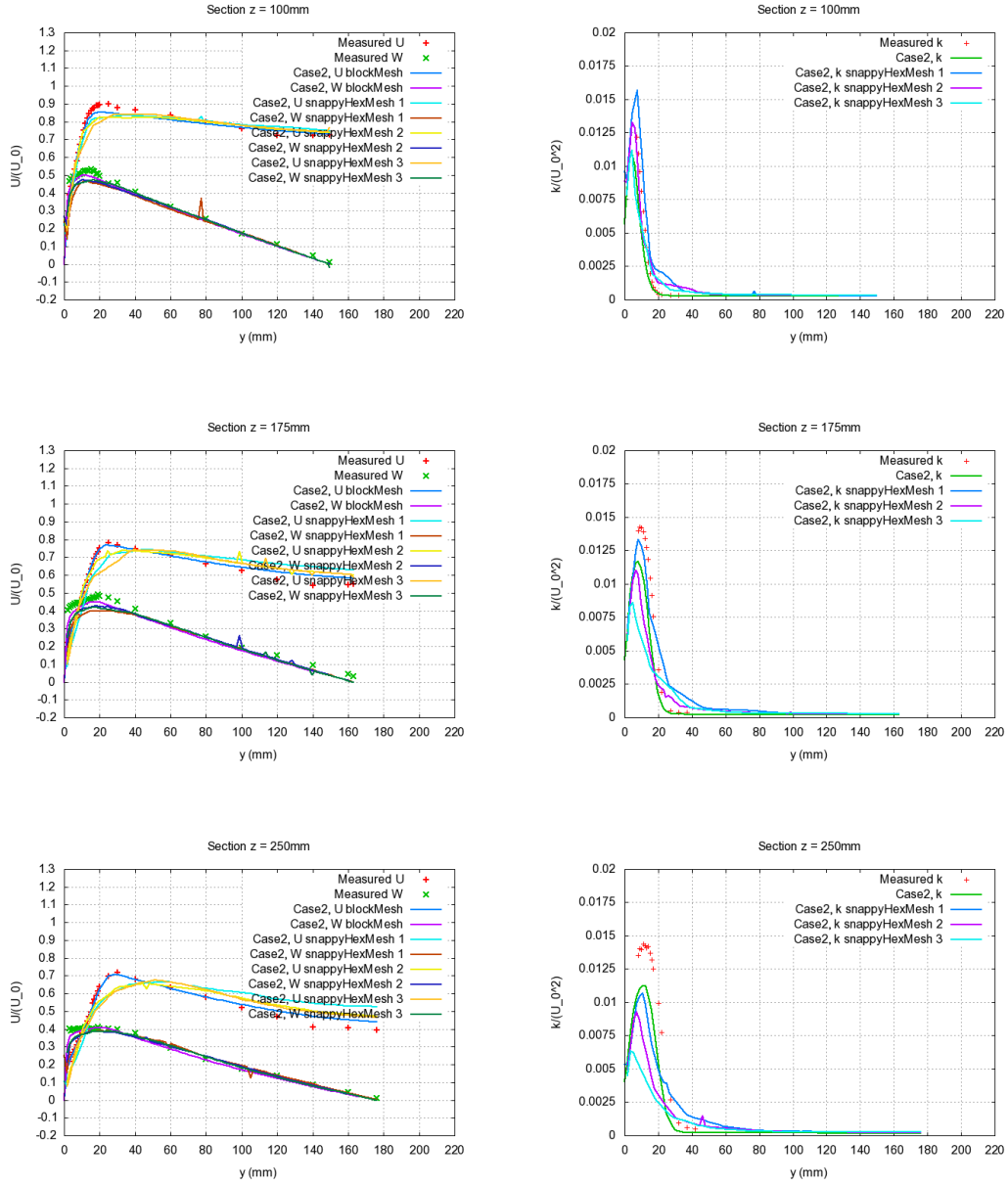


Figure B.20 Solutions RANS Cas 3 maillage snappyHexMesh

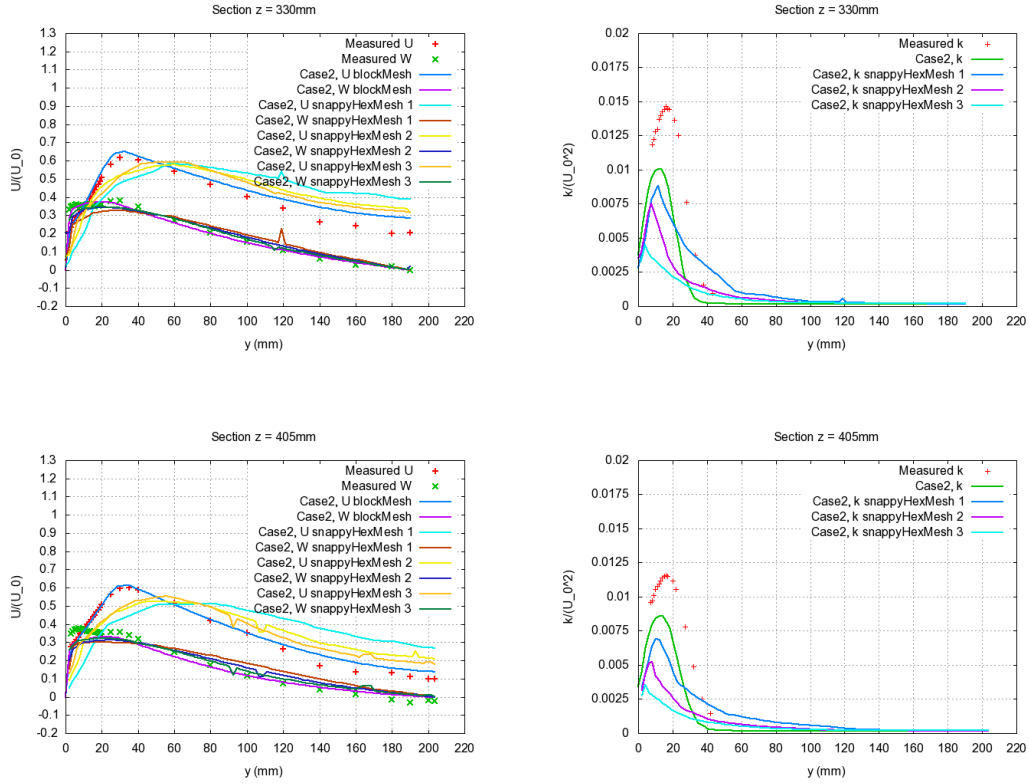


Figure B.21 Solutions RANS Cas 3 maillage snappyHexMesh

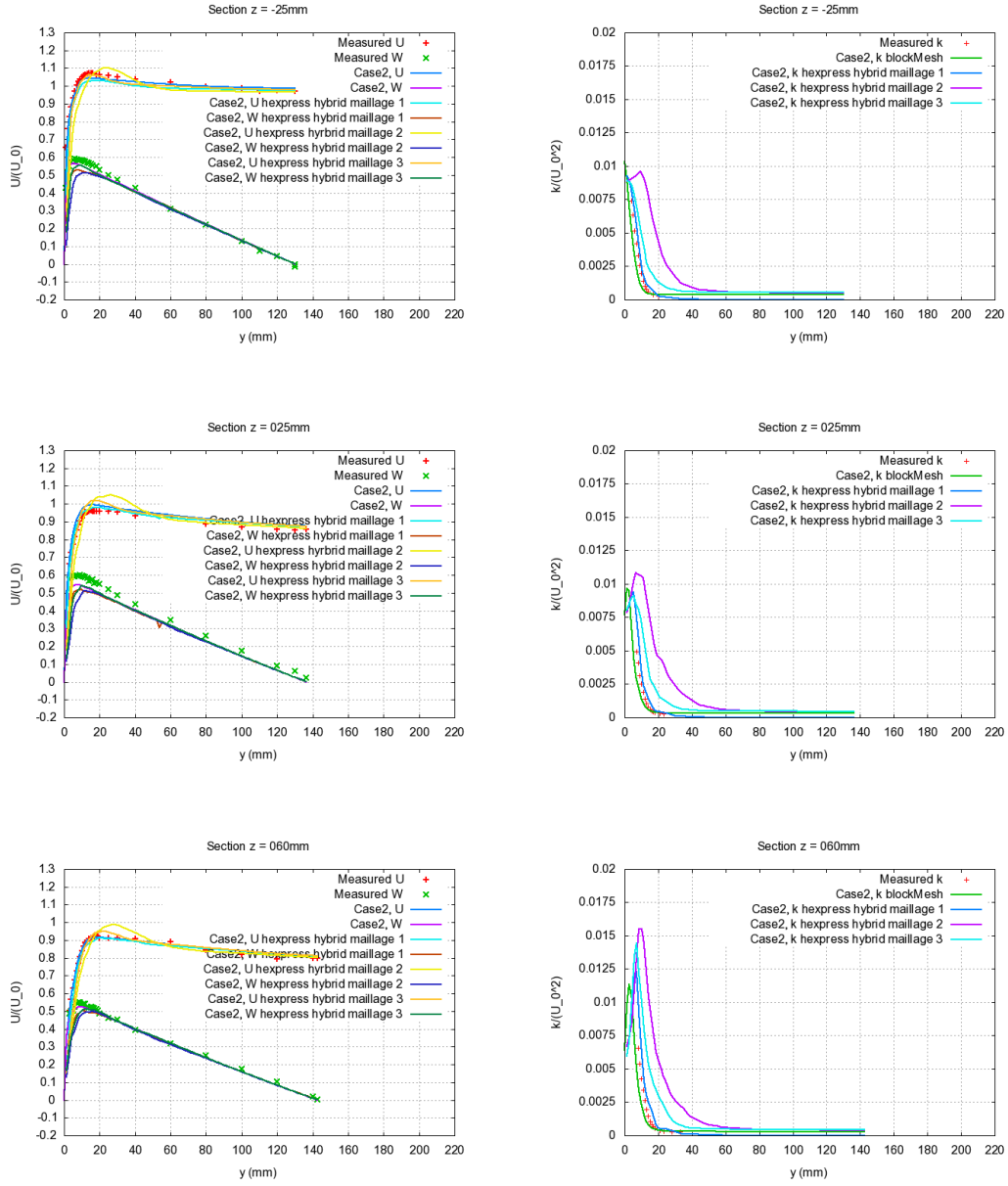


Figure B.22 Solutions RANS Cas 3 maillage Hexpress Hybrid

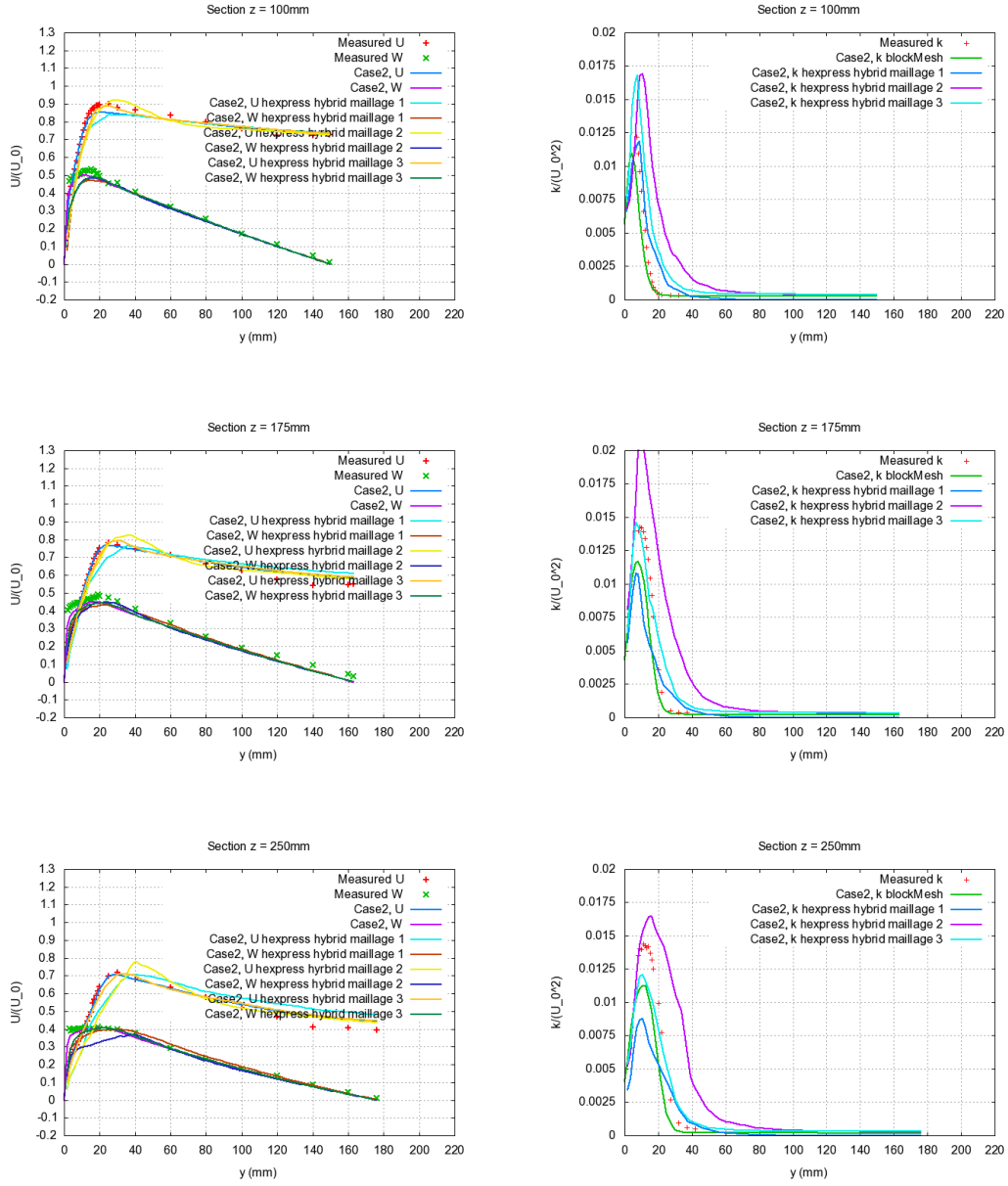


Figure B.23 Solutions RANS Cas 3 maillage Hexpress Hybrid

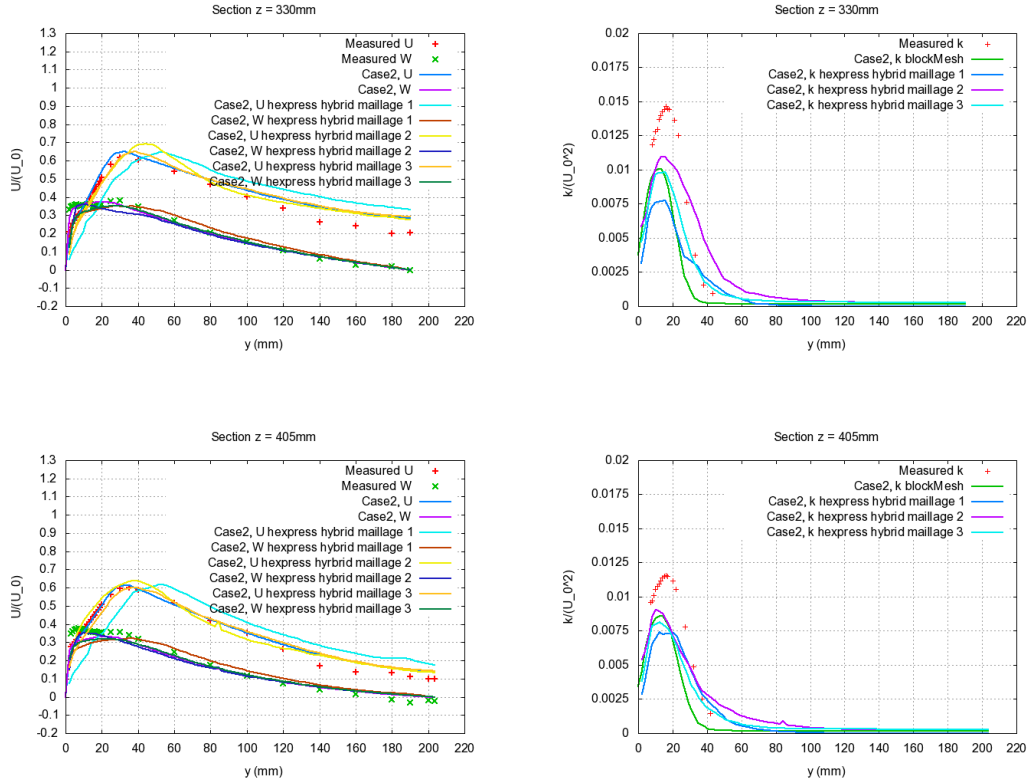


Figure B.24 Solutions RANS Cas 3 maillage Hexpress Hybrid

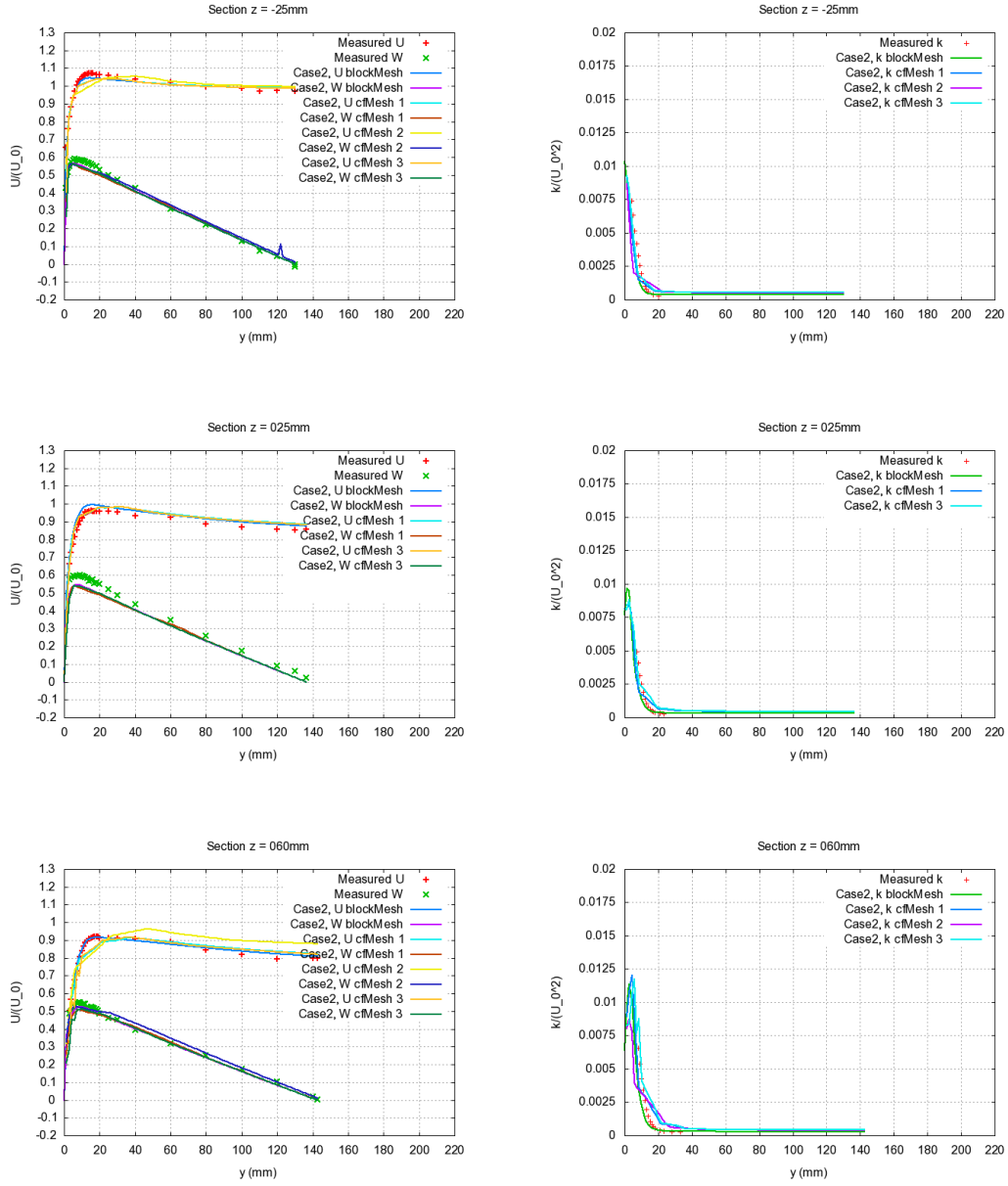


Figure B.25 Solutions RANS Cas 3 maillage cf Mesh

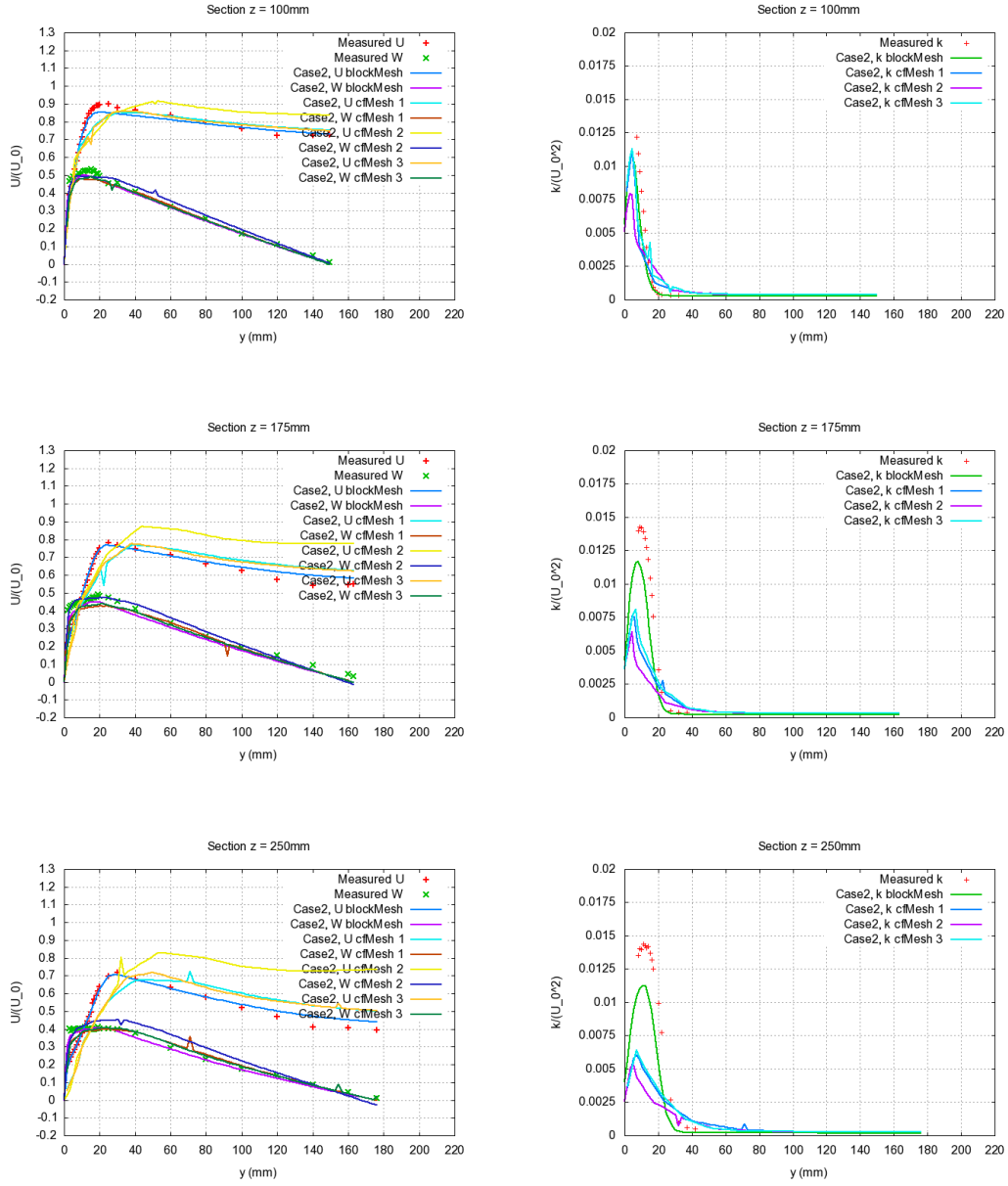


Figure B.26 Solutions RANS Cas 3 maillage cf Mesh

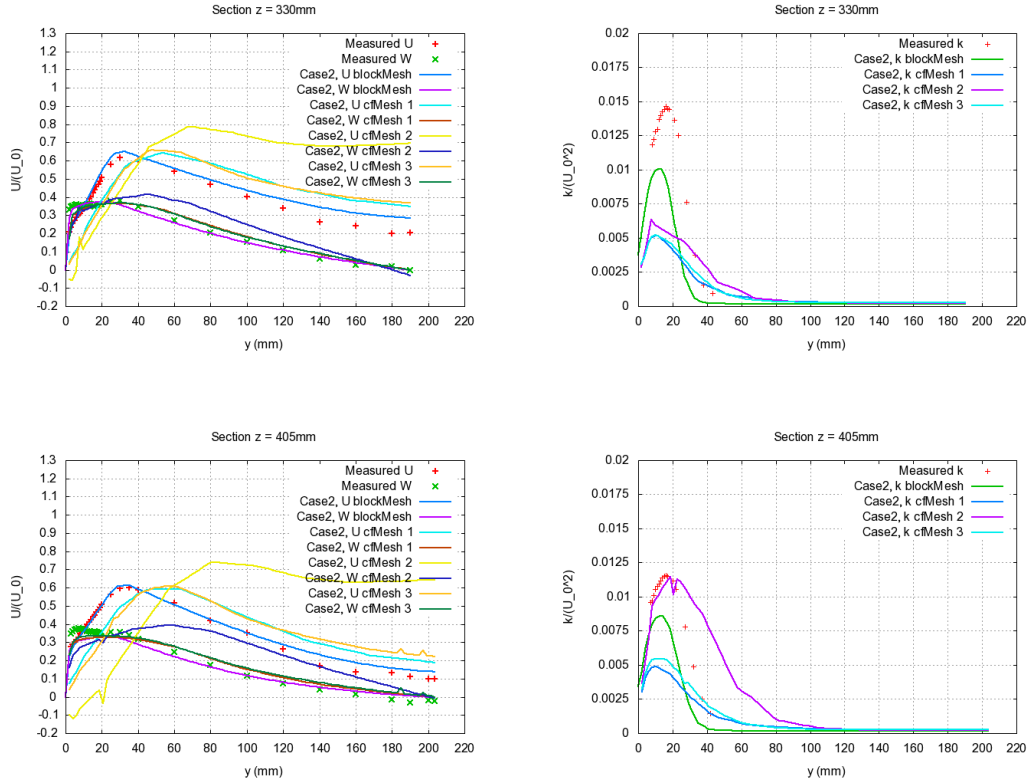


Figure B.27 Solutions RANS Cas 3 maillage cf Mesh